



HAL
open science

Development of a framework to integrate mobile manipulators as cyber-physical systems into existing production systems in the context of Industry 4.0

Nooshin Ghodsian

► To cite this version:

Nooshin Ghodsian. Development of a framework to integrate mobile manipulators as cyber-physical systems into existing production systems in the context of Industry 4.0. Automatic. HESAM Université, 2023. English. NNT : 2023HESAE088 . tel-04861170

HAL Id: tel-04861170

<https://pastel.hal.science/tel-04861170v1>

Submitted on 2 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET METIERS DE L'INGENIEUR

**Laboratoire Conception de Produits et Innovation (LCPI)
Campus de Paris**

THÈSE

présentée par : **Nooshin GHODSIAN**

soutenue le : **08 Décembre 2023**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée au : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Industrial Engineering**

**Development of a framework to integrate mobile
manipulators as cyber–physical systems into existing
production systems in the context of industry 4.0**

THÈSE dirigée par :
Dr. Khaled BENFRIHA

et co-encadrée par :
Dr. Adel OLABI Dr. Varun GOPINATH

M. Ali SIADAT	Professeur, Arts et Métiers Institute of Technology	Jury
M. Abdelaziz BOURAS	Professeur, Qatar university	President
M. Abdelkhalak El HAMI	Professeur, INSA Rouen	Rapporteur
Mme. Esma TALHI	Associate Professor, EIGSI	Rapporteur
M. Am´eziane AOUSSAT	Professeur, Arts et Métiers Institute of Technology	Examinatrice
		Examineur

Acknowledgements

I would like to express my deepest gratitude to Dr. Khaled Benfriha, Dr. Adel Olabi, and Dr. Varun Gopinath, my thesis advisors, for their unwavering support and invaluable guidance throughout this journey. Their expertise and insightful feedback have been instrumental in shaping this research. My heartfelt thanks also go to the members of my thesis committee, for their constructive criticisms and suggestions which have greatly enriched my work. Special acknowledgment is due to Mr. Aurélien Arnou, whose expertise in the field was indispensable during the technical experiments involving Omron robots.

I am profoundly grateful to my family. My mother and my father made every possible effort to support me in achieving my aspirations. My brother, my sister, and my nephew for their endless love and support. And, a special thanks to my husband, Ehsan, for his endless love, patience, and encouragement. Their support has been my pillar of strength and has kept me grounded throughout this academic pursuit.

Finally, I would like to extend my appreciation to everyone who directly or indirectly contributed to this research, and who has made this journey both possible and memorable.

ACKNOWLEDGEMENTS

Résumé

Avec l'émergence des Systèmes Cyber-Physiques (CPS) dans le cadre de la quatrième révolution industrielle, la discussion sur l'architecture distribuée, la coordination et la communication étendue entre tous les composants d'un système a été soulevée. D'autre part, la fabrication industrielle moderne repose fortement sur la production flexible. Les manipulateurs mobiles autonomes (MM) ont le potentiel d'améliorer la flexibilité des environnements de fabrication existants. Avec les avantages associés à cette technologie, il y a une augmentation de la demande de MM. Ainsi, l'ajout d'un nouveau MM en tant que nouveau CPS dans un système suivant l'industrie 4.0 nécessite un cadre pour tirer tous les avantages de celui-ci. Dans cette thèse, un cadre est proposé pour intégrer les MM en tant que CPS dans un système de production existant.

Commencant par les Objectifs et Applications, cette phase définit clairement les rôles des MM et assure leur alignement avec les objectifs de fabrication plus larges. La phase suivante, Infrastructure Readiness, évalue la configuration actuelle, les forces et les domaines nécessitant des améliorations, prépare le terrain pour les opérations des MM et sélectionne le MM idéal. La phase d'intégration est une approche multicouche : l'intégration physique intègre de manière transparente les MM dans leur environnement. L'intégration communicationnelle améliore l'échange coordonné de données entre le MM et les systèmes existants. L'intégration fonctionnelle et opérationnelle aligne les activités des MM sur les tâches en cours. De plus, l'Intégration Numérique place le MM dans le domaine numérique de l'Industrie 4.0 et exploite des outils avancés. Alimentant cela, une architecture modulaire orientée service (MSOA) qui offre une évolutivité et une adaptabilité en temps réel. Les MM sont décomposés en modules standard, à la fois matériels tels que les bras robotiques et fonctionnels tels que les communications. Les modules correspondants garantissent que cette intégration se déroule en douceur. L'aspect service est soigneusement conçu : il définit les applications des MM en tant que services. La décomposition du service les divise en opérations standard avec des détails spécifiés du service. De

RESUME

plus, la Découverte de Service garantit que les MM communiquent de manière transparente avec les composants du système.

De plus, le cadre a été appliqué à une ligne de production de recherche appelée Plateforme 4.0 à Arts et Métiers. Un MM de la société OMRON (appelé MoMa) a été intégré dans le système de production existant. Les résultats de cette démonstration réelle montrent que MoMa est capable d'augmenter avec succès la flexibilité, l'autonomie et l'efficacité d'un système de production à l'aide de signaux de commande provenant du Système d'Exécution de Fabrication (MES).

Mots-clés : Industrie 4.0 ; Systèmes cyber-physiques ; Manipulateurs mobiles ; Cadre d'intégration

RESUME

RESUME

Abstract

With the emergence of the Cyber-Physical Systems (CPSs) along with the fourth industrial revolution, the discussion of distributed architecture and coordination and extensive communication between all components of a system was raised. On the other hand, modern industrial manufacturing relies heavily on flexible production. Autonomous Mobile Manipulators (MMs) have the potential to improve the flexibility of existing manufacturing environments. With the advantages associated with this technology, there is an upsurge in the demand for MMs. Thus, adding a new MM as a new CPS into a system following industry 4.0 requires a framework to help taking all the advantages from it. In this thesis, a framework is proposed to integrate MMs as CPSs into an existing production system. Starting with Objectives and Applications, this phase clearly defines MM roles and ensures their alignment with larger manufacturing goals. The next Infrastructure Readiness phase assesses the current setup, strengths and areas in need of improvement, paves the way for MM operations and selects the ideal MM. The integration phase is a multi-layered approach : physical integration seamlessly embeds MMs into their environment. Communicational integration enhances the coordinated exchange of data between MM and existing systems. Functional and operational integration aligns MM activities with ongoing tasks. Moreover, Digital Integration puts MM in the digital realm of Industry 4.0 and leverages advanced tools. Powering this, is a modular service-oriented architecture (MSOA) that provides scalability and real-time adaptability. MMs are broken down into standard modules, both hardware such as robotic arms and functional such as communications. Matching modules ensure that this integration is smooth. The service aspect is carefully designed : it defines the MM applications as services. Decomposition of service divides them into standard operations with specified details of the service. In addition, Service Discovery ensures that MMs communicate seamlessly with system components. Furthermore, the framework has been applied to a research production line called Platform 4.0 at Arts et Métiers. An MM from OMRON Company (called MoMa) has been integrated into the

ABSTRACT

existing production system. Results from this real-world demonstration show that MoMa is capable of successfully increasing flexibility, autonomy, and efficiency of a production system using command signals from Manufacturing Execution System (MES).

Keywords : Industry 4.0; Cyber-physical systems; Mobile manipulators; Integration framework

Table of contents

Acknowledgements	3
Résumé	5
Abstract	9
List of tables	19
List of figures	25
1 Introduction	27
1.1 Problem description	29
1.1.1 Economic aspect	30
1.1.2 Complexity of integration	30
1.2 Hypothesis	31
1.3 Contribution	31
1.4 Research Methodology	32
1.5 Structure of the rest of the thesis	34
2 State of the art	35
2.1 Overview of Industry 4.0	36
2.1.1 Cyber-physical systems : The core of Industry 4.0	37

TABLE OF CONTENTS

2.1.2	Integration and interoperability	40
2.2	State of the art in automation and industrial robotics	42
2.2.1	Robotics over time : new features and the shift to modern integration	42
2.2.2	Mobile manipulation : From research to industry	46
2.2.2.1	Mobile manipulators for industrial applications	49
2.2.2.2	Mobile manipulators in Industry 4.0	61
2.3	Conclusion	74
3	Development of the framework	77
3.1	Phase I : Objectives and Applications	79
3.1.1	Defining integration goals	80
3.1.1.1	Flexibility	80
3.1.1.2	Ergonomics	81
3.1.1.3	Quality	82
3.1.1.4	Automation	83
3.1.2	Defining applications	84
3.1.2.1	Logistics	84
3.1.2.2	Production	84
3.1.2.3	Service	85
3.1.2.4	Innovative	85
3.2	Phase II : Infrastructure readiness	91
3.3	Phase II-I : Pre-study	91
3.3.1	General prerequisites	92
3.3.1.1	Working area and physical assessment	92
3.3.1.2	Production plan	95
3.3.1.3	Managerial consideration	96

TABLE OF CONTENTS

3.3.2	Prerequisites based on the principles of Industry 4.0	97
3.3.2.1	Decentralization and autonomous decisions	97
3.3.2.2	Interoperability and interconnectivity	99
3.3.2.3	Modularity	100
3.3.2.4	Real-time Capability	100
3.3.2.5	Virtualization	101
3.3.2.6	Service orientation	102
3.4	Phase II-II : Infrastructure modification and MM selection	102
3.5	Phase III : Integration	104
3.5.1	Integration types	104
3.5.1.1	Physical integration	104
3.5.1.2	Communicational integration	105
3.5.1.3	Functional and operational integration	106
3.5.1.4	Digital integration	107
3.5.2	Integration Types and Industry 4.0 Principles : A Synergistic Framework for Modern Manufacturing	108
3.5.2.1	A modular service-oriented architecture with adaptive decentralization based on real-time interoperability and virtual capabilities (MSOA)	110
3.6	Conclusion	113
4	Experimentation	115
4.1	Introduction to Platform 4.0	116
4.1.1	Control system : MES	116
4.2	Introduction to our mobile manipulator architecture	117
4.2.1	Hardware architecture	117
4.2.2	Software architecture	118

TABLE OF CONTENTS

4.3	Case study : Deployment of the proposed framework Integration process of mobile manipulator into the platform 4.0	118
4.3.1	Phase I : Objectives and Applications	119
4.3.2	Phase II : Infrastructure readiness	119
4.3.2.1	Phase II-I : Pre-study	119
4.3.3	Phase II-II : Infrastructure modification and MM selection	123
4.3.4	Phase III : Integration	123
4.3.4.1	Physical Integration	123
4.3.4.2	Communicational Integration	124
4.3.4.3	Functional and Operational Integration	125
4.3.4.4	Digital Integration	130
4.4	Discussion	131
5	Conclusion and perspectives	135
5.1	Perspectives	139
5.1.1	Fleet-sizing problem	139
5.1.2	Task allocation	141
5.1.3	Flexibility evaluation	142
	Liste des annexes	160
	A List of publications	161
	B Thèse en français	163
B.1	Introduction	163
B.2	Description du problème	166
B.2.1	Aspect économique	166
B.2.2	Complexité de l'intégration	166

TABLE OF CONTENTS

B.3	Hypothèse	167
B.4	Contribution	168
B.5	Méthodologie de recherche	168
B.6	Aperçu de l'Industrie 4.0	171
B.6.1	Systèmes cyber-physiques : le cœur de l'Industrie 4.0	173
B.6.2	Intégration et interopérabilité	176
B.7	État de l'art de l'automatisation et de la robotique industrielle	178
B.7.1	Robotique au fil du temps : nouvelles caractéristiques et passage à l'intégration moderne	179
B.7.2	Manipulation mobile : de la recherche à l'industrie	183
B.7.2.1	Manipulateurs mobiles pour applications industrielles	186
B.7.2.2	Manipulateurs mobiles dans l'Industrie 4.0	199
B.8	Conclusion	214
B.9	Développement du framework	215
B.10	Phase I : Objectifs et Applications	216
B.10.1	Définition des objectifs d'intégration	217
B.10.1.1	Flexibilité	218
B.10.1.2	Ergonomie	219
B.10.1.3	Qualité	220
B.10.1.4	Automatisation	221
B.10.2	Définition des applications	222
B.10.2.1	Logistique	222
B.10.2.2	Production	222
B.10.2.3	Service	223
B.10.2.4	Innovant	223
B.11	Phase II : Préparation de l'infrastructure	230

TABLE OF CONTENTS

B.12 Phase II-I : Étude préalable	230
B.12.1 Prérequis généraux	231
B.12.1.1 Zone de travail et évaluation physique	231
B.12.1.2 Plan de production	234
B.12.1.3 Considérations managériales	236
B.12.2 Prérequis basés sur les principes de l'Industrie 4.0	237
B.12.2.1 Décentralisation et décisions autonomes	237
B.12.2.2 Interopérabilité et interconnectivité	238
B.12.2.3 Modularité	239
B.12.2.4 Capacité en temps réel	240
B.12.2.5 Virtualisation	241
B.12.2.6 Orientation vers le service	242
B.13 Phase II-II : Modification de l'infrastructure et sélection de MM	243
B.14 Phase III : Intégration	244
B.14.1 Types d'intégration	244
B.14.1.1 Intégration physique	244
B.14.1.2 Intégration communicationnelle	245
B.14.1.3 Intégration fonctionnelle et opérationnelle	247
B.14.1.4 Intégration numérique	248
B.14.2 Types d'intégration et principes de l'Industrie 4.0 : Un cadre synergique pour la fabrication moderne	249
B.14.2.1 Une architecture modulaire orientée services avec une décentralisation adaptative basée sur l'interopérabilité en temps réel et les capacités virtuelles (MSOA)	251
B.15 Conclusion	255
B.16 Expérimentation	256

TABLE OF CONTENTS

B.17 Introduction to Platform 4.0	256
B.17.1 Système de contrôle : MES	256
B.18 Introduction à notre architecture de manipulateur mobile	257
B.18.1 Architecture matérielle	257
B.18.2 Architecture logicielle	259
B.19 Étude de cas : Déploiement du cadre proposé Processus d'intégration du manipulateur mobile dans la plateforme 4.0	259
B.19.1 Phase I : Objectifs et Applications	260
B.19.2 Phase II : Préparation de l'infrastructure	260
B.19.2.1 Phase II-I : Pré-étude	260
B.19.3 Phase II-II : Modification de l'infrastructure et sélection du manipulateur mobile	264
B.19.4 Phase III : Intégration	265
B.19.4.1 Intégration Physique	265
B.19.4.2 Intégration de Communication	266
B.19.4.3 Intégration Fonctionnelle et Opérationnelle	267
B.19.4.4 Intégration Numérique	273
B.20 Discussion	274
B.21 Conclusion et perspectives	277
B.22 Perspectives	281
B.22.1 Problème de dimensionnement de flotte	281
B.22.2 Allocation des tâches	283
B.22.3 Évaluation de la flexibilité	285

TABLE OF CONTENTS

List of tables

2.1	Classification of MM Industrial Applications	50
2.2	Summary of MM Applications in Various Industries	60
2.3	Comparison of Different MM Control Strategies	66
4.1	Components Integrated to Form the MoMa Omron	118
4.2	Tasks and Operations of Devices	126
4.3	Variables and Descriptions	130
B.1	Classification of MM Industrial Applications	187
B.2	Summary of MM Applications in Various Industries	197
B.3	Comparison of Different MM Control Strategies	204
B.4	Components Integrated to Form the MoMa Omron	258
B.5	Tâches et opérations des dispositifs	268
B.6	Variables et Descriptions	273

LIST OF TABLES

List of figures

1.1	Classical architecture of a mobile manipulator	28
1.2	Research Methodology	32
2.1	information and digital technologies in smart manufacturing adapted from Ghobakhloo	37
2.2	CPS maturity model adapted from Monostori et al.	38
2.3	architecture for implementation of CPS adapted from J. Lee et al.	40
2.4	Dimensions of integration adapted from Bangemann et al.	41
2.5	From Robotics 1.0 to 4.0 adopted from	43
2.6	framework for implementation of collaborative robots by	45
2.7	Timeline of existing MMs from 1984 to 2010 adopted from	47
2.8	a time line of different projects contributed to MM developments	48
2.9	A representation to achieve proper infrastructure for MM integration inspired by . . .	49
2.10	Suitability of utilizing MMs for each class of industrial operations adopted from	50
2.11	Littles helpers from first generation to the seventh one (from left to right) adopted from	51
2.12	The controlling system proposed by for integrating MMs into production systems . .	52
2.13	Little Helper 3 from Aalborg University (Left) omniRob from KUKA (Right)	52
2.14	Using MM to carry large parts with human cooperation adopted from	54
2.15	assembly of solar thermal collectors adopted from	54
2.16	SAPHARI project : industrial applications required at Kuka (left) and aircraft assembly requirement of Airbus (right) adopted from	55

LIST OF FIGURES

2.17 ColRobot prototype for aerospace industries (KMR IIWA) adopted from	55
2.18 ColRobot prototype for automotive industries adopted from	56
2.19 BAZAR MM adopted from	56
2.20 ISABEL MM implementation for wafer box pick and place in clean room adopted from	57
2.21 Mirror reflectivity measurement at VALLLE energy plant by MAINBOT adopted from	58
2.22 The use of MM in aerospace production system of Airbus Defence Space adopted from	59
2.23 KUKA VALERI mobile manipulator adopted from	59
2.24 SAPHARI demonstrations : left- Airbus use case, right- Kuka use case adopted from	70
2.25 MM designed in THOMAS project adopted from	71
2.26 co-occurrence map based on text data	74
2.27 Density visualization of terms related to MMs	75
3.1 General phases of the proposed framework of integrating MMs into existing production systems	79
3.2 Key categories of mobile manipulators objectives and applications (Phase I of the framework)	80
3.3 Maturity levels of Industry 4.0 from from FIR e.V. at RWTH Aachen University . . .	86
3.4 the symbiotic relationship between different integration types and the foundational principles of Industry 4.0	109
3.5 On the top, is a high-level representation of the various modules and services; On the bottom, is a detailed visualization of the complexities and interconnections of system components.	111
3.6 The appropriateness of each of the decentralized, centralized, or hybrid approaches according to different indicators	113
4.1 Platform 4.0	116
4.2 OMRON MoMa physical architecture	117
4.3 Considerations and challenges in each step of experimental integration	119

LIST OF FIGURES

4.4	Industrial platform 4.0 equipment	122
4.5	Platform 4.0 map with dimensions	122
4.6	Communication and data transmission between MoMa and MES	125
4.7	Standard tasks, parameters, and operations required to fulfil an example service of pick and place	125
4.8	Vision guided picking operation of raw parts (left) and Vision guided placing operation of raw parts (right)	127
4.9	MoMa integrated into the digital twin (left) vs platform 4.0 (right).	131
B.1	Architecture classique d'un manipulateur mobile	164
B.2	Méthodologie de recherche	169
B.3	technologies de l'information et numériques dans la fabrication intelligente adaptées de Ghobakhloo	172
B.4	Modèle de maturité des SCP adapté de Monostori et al.	174
B.5	architecture pour la mise en œuvre des SCP adaptée de J. Lee et al.	176
B.6	Dimensions de l'intégration adaptées de Bangemann et al.	178
B.7	De la Robotique 1.0 à 4.0 adapté de	179
B.8	Cadre pour la mise en œuvre de robots collaboratifs par	181
B.9	Chronologie des MMs existants de 1984 à 2010 adoptée de	184
B.10	Une chronologie de différents projets ayant contribué aux développements des MMs . .	185
B.11	Une représentation pour atteindre une infrastructure appropriée pour l'intégration des MM inspirée de	186
B.12	Adéquation de l'utilisation des MMs pour chaque classe d'opérations industrielles adoptée de	187
B.13	Petits aides de la première génération à la septième (de gauche à droite) adopté de . .	188
B.14	Le système de contrôle proposé par pour intégrer les MMs dans les systèmes de production	189
B.15	Little Helper 3 de l'Université d'Aalborg (Gauche) omniRob de KUKA (Droite)	189

LIST OF FIGURES

B.16 Utilisation de MM pour transporter de grandes pièces avec la coopération humaine adoptée de	191
B.17 Utilisation d'un MM collaboratif à charge utile élevée pour l'assemblage chez CALPAK adopté de	192
B.18 Projet SAPHARI : applications industrielles requises chez Kuka (à gauche) et exigences d'assemblage d'avions chez Airbus (à droite) adoptées de	192
B.19 Prototype ColRobot pour l'industrie aérospatiale (KMR IIWA) adopté de	193
B.20 Prototype ColRobot pour l'industrie automobile adopté de	193
B.21 MM BAZAR adopté de	194
B.22 Implémentation du MM ISABEL pour la prise et la pose de boîtes de plaquettes dans une salle blanche adoptée de	194
B.23 Mesure de la réflectivité du miroir dans la centrale énergétique de VALLLE par MAIN-BOT adoptée de	195
B.24 Utilisation du MM dans le système de production aérospatiale d'Airbus Defence Space adoptée de	197
B.25 Manipulateur mobile KUKA VALERI adopté de	197
B.26 Démonstrations SAPHARI : à gauche - cas d'utilisation Airbus, à droite - cas d'utilisation Kuka adoptés de	209
B.27 MM conçu dans le projet THOMAS adopté de	210
B.28 carte de co-occurrence basée sur des données textuelles	214
B.29 visualisation de densité des termes liés aux MMs	215
B.30 Phases générales du cadre proposé pour l'intégration des MMs dans les systèmes de production existants	216
B.31 Catégories clés des objectifs et des applications des manipulateurs mobiles (Phase I du cadre)	217
B.32 Niveaux de maturité de l'Industrie 4.0 de FIR e.V. à l'Université RWTH d'Aix-la-Chapelle	224

LIST OF FIGURES

B.33 La relation symbiotique entre différents types d'intégration et les principes fondamentaux de l'Industrie 4.0	251
B.34 En haut, une représentation de haut niveau des divers modules et services ; En bas, une visualisation détaillée des complexités et des interconnexions des composants du système.	253
B.35 La pertinence de chacune des approches décentralisées, centralisées ou hybrides selon différents indicateurs	255
B.36 Plateforme 4.0	257
B.37 Architecture physique de MoMa d'OMRON	258
B.38 Considérations et défis à chaque étape de l'intégration expérimentale	260
B.39 Équipement de la plateforme industrielle 4.0	263
B.40 Plan de la plateforme 4.0 avec dimensions	264
B.41 Diagramme de connexion réseau pour l'intégration de MoMa	267
B.42 Tâches standard, paramètres et opérations requis pour remplir un exemple de service de prise et de placement	267
B.43 Opération de cueillette guidée par vision de pièces brutes (gauche) et opération de placement guidé par vision de pièces brutes (droite)	269
B.44 MoMa intégré au jumeau numérique (gauche) vs plateforme 4.0 (droite).	274

LIST OF FIGURES

Chapitre 1

Introduction

content

1.1	Problem description	29
1.1.1	Economic aspect	30
1.1.2	Complexity of integration	30
1.2	Hypothesis	31
1.3	Contribution	31
1.4	Research Methodology	32
1.5	Structure of the rest of the thesis	34

We live in a world increasingly digitized and the way products are made has changed. The traditional manufacturing industry in the world has been greatly affected by digital transformation. This evolution has made emerging technologies such as intelligent robots, autonomous drones, sensors, and 3D printing ubiquitous. The speed of these changes continues to increase, and companies as well as their industrial processes must be accompanied for the successful integration of new technologies. In Industry 3.0, computers came into play, but in Industry 4.0, computers are connected and embedded intelligence will bring agility and autonomy to decisions. The combination of Cyber-Physical Systems (CPS), the Internet of Things (IoT), and cloud manufacturing will make smart factories a reality [1]. For companies, the main goal of moving towards Industry 4.0 is to pursue performance in line with new societal demands. To do this, they must create a connected ecosystem with enhanced cognitive capabilities for optimizing and controlling manufacturing systems [2]. This ecosystem is based on many factors. Technological factors such as machine learning, advanced robotics, industrial IoT, and other new technologies [3]. Strategic factor suggests that companies must improve their infrastructure to remain competitive and also shift their business models and include data-driven models as well [4].

The last but not least factor is to develop skills that will be necessary for the sustainability of an ultra-connected industry. Industry 4.0 is also recognized as a decisive factor in improving production flexibility, which increases a company’s capacity to respond immediately to consumer requests and boost the efficiency of the manufacturing system without incurring additional expenses or using important amounts of resources [5]. After collaborative robots (cobots) and collaborative mobile robots, the systems consisting of a robot arm onboard a mobile robot are the next step to help improve the performance, especially by increasing flexibility [6]. These systems are usually referred to as autonomous Mobile Manipulators (MMs) that can perform a variety of tasks, including logistics, pick and place, and handling [7]. The classical architecture of an MM consists of a mobile platform system, a robot manipulator system, a tooling system, and a vision system, as shown in Figure 1.1.

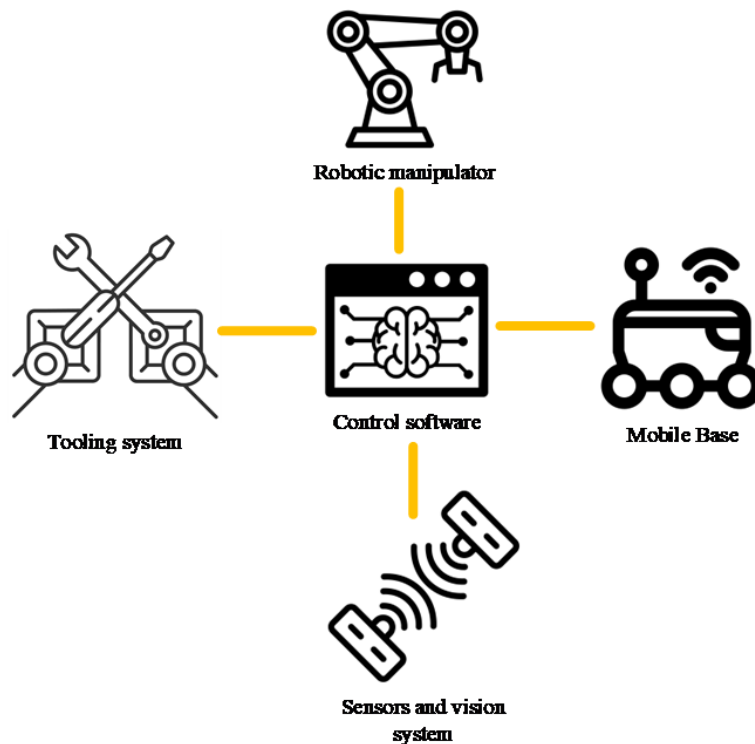


FIGURE 1.1 – Classical architecture of a mobile manipulator

With the combination of different types of mobile robots, robotic arms, vision, and tooling systems, several types and designs of MMs can be achieved. For example, choosing between Automated Guided Vehicles (AGVs) - that are attached to tracks or cables on the ground, or use radio signals, imaging cameras, magnets, or lasers to guide navigation, - or Autonomous Mobile Robots (AMRs) - that can

navigate automatically - for the mobile base. Or the choice between traditional industrial robots or collaborative robots attached to different types of tools as end effectors can provide different applications. A detailed introduction to different types of robots is provided in section 2.2.1. As a result, autonomous robotic systems have the potential to improve the flexibility of existing manufacturing environments. In addition, the new functionalities offered by MMs and their ability to move around an industrial production process have aroused great interest. Consequently, there is an upsurge in the demand for MMs but their integration into the manufacturing process is far from being evident[8]. For companies that intend to benefit from MMs, a complete roadmap and framework are required to integrate a highly advanced device. Especially, when a production system exists with old and conventional equipment. Integration of a new CPS, as MM, is not only a simple connection between the physical devices but an efficient communication between the shop floor components and the controlling systems such as Manufacturing Execution Systems (MES). This means dealing with the data processed and the information exchanged, as well as aligning business processes.

As mentioned before, the integration of MM is complex because its control system is often not compatible with the expected operational features, especially if a smart control between MM and MES is expected. This smart control allows supervising the whole process in real-time, which enables to provide the ability to quickly respond to changes. Also, many industrialists are unaware of the current limitations of this type of CPS. Thus, our research findings, expressed as a methodological contribution, could be used by industrial decision-makers to guide them through different steps regarding the installation of an MM from functional, technological, and organizational perspectives.

1.1 Problem description

In the evolving landscape of Industry 4.0, the integration of MMs as CPSs into existing manufacturing systems presents significant challenges. While MMs have the potential to revolutionize production lines by providing increased flexibility, adaptability, and efficiency, industries often face barriers to seamless integration of these systems due to a variety of operational, infrastructure, and communication concerns. Furthermore, there is a significant gap between promising developments in MMs and their actual adoption in real-world production environments. A systematic approach to guide this integration, which addresses potential benefits and concerns, is currently lacking. Developing such a framework is in the context of this thesis.

1.1.1 Economic aspect

The economic consequences of weak technology integrations are significant. It is not just about initial investment costs, but also potential lost revenue from malfunctions, inefficiencies, or failed implementation. The latter can sometimes be much more than the initial costs. As well, correcting mistakes after implementation can be even more expensive. Furthermore, indirect costs may be added, such as contractual penalties or loss of customer trust due to delays or unfulfilled promises. In addition, when resources are tied up in an inefficient or failed integration, this can slow investment momentum and raise doubts about the strategic choices made.

1.1.2 Complexity of integration

For several reasons, this integration can be complicated. Undefined goals are one of the challenging aspects that can compromise successful integration. Existing infrastructure may not always be compatible with new technologies. Without a clear assessment and possible changes, integration may face operational problems. Ensuring effective communication between new technology (MMs, in this case) and existing systems is critical. Indeed, new technologies can sometimes disrupt existing operations if not properly synchronized, it is critical to ensure that they are embedded in the broader digital architecture. Without it, companies may not take full advantage of advanced digital tools. With increased digitization and connectivity, there arises the challenge of effectively managing vast amounts of data and ensuring its security. As industries adopt more advanced technologies, ensuring that these systems can seamlessly work alongside human operators without compromising safety becomes vital. Also, as technologies are continuously evolving, there might be concerns about whether an integration made today will still be valid or efficient in the future. A standard framework ensures consistency and adherence to best practices.

The fundamental problem therefore is : **“How can industries effectively integrate MMs as CPS into their existing manufacturing systems, ensuring economic feasibility, operational compatibility, efficient communication, and secure data management while maximizing the benefits of flexibility, adaptability, and smart control?”**

This leads us to the research questions :

- What are the key industrial needs and concerns associated with the integration of MMs into

existing production systems?

- How can a structured framework address the hesitations industries face regarding MMs?
- In what ways can the proposed framework enhance production flexibility, provide greater fluidity in scheduling operations, and have no impact on sensitive operations once integrating MMs?
- How can the proposed framework be validated and refined to ensure its effectiveness in a real-world production environment?

1.2 Hypothesis

Based on the outlined problem description, it became evident that a specialized framework is imperative for the seamless integration of MMs, addressing the prevalent industry apprehensions regarding their extensive deployment. In this section, hypotheses are stated that are rooted in the industrial challenges and concerns, highlighting our assumptions that the proposed framework can offer viable solutions.

- A structured integration framework will significantly reduce compatibility issues between MMs and existing production systems, which allow more fluidity and flexibility during the execution of different operations.
- Addressing key industrial concerns through the proposed framework, such as safety, data protection, interoperability, etc., the adoption rate of MMs in real-world production environments could increase.

1.3 Contribution

The contribution of our research work is to propose a new methodology to facilitate the integration of MM into an existing industrial process. It is already seen that MM technologies are both sought-after and feared. Sought-after, because they contribute to the digitization of production lines through new functionalities such as autonomy and flexibility. Dreaded, because their adoption can generate several risks, notably due to technological complexity, investment costs, the skills required to make them effective, and maintenance aspects. This approach is based on a comprehensive view of the production system by examining the complexities from the very concrete operations on the shop floor

to the more abstract decision-making areas of the management layer and control systems. While there is considerable research on the MMs, there is a gap when it comes to their practical implementation in industries. This framework might fill this gap by focusing on the actual deployment and use of MMs in real-world scenarios.

1.4 Research Methodology

This study was formed with a multi-faceted method. Reviewing related literature, trial and error during iterative experiments in the laboratory, creating a basic framework, and developing and improving it using experiences during different experiments. Figure 1.2 illustrates the research methodology.

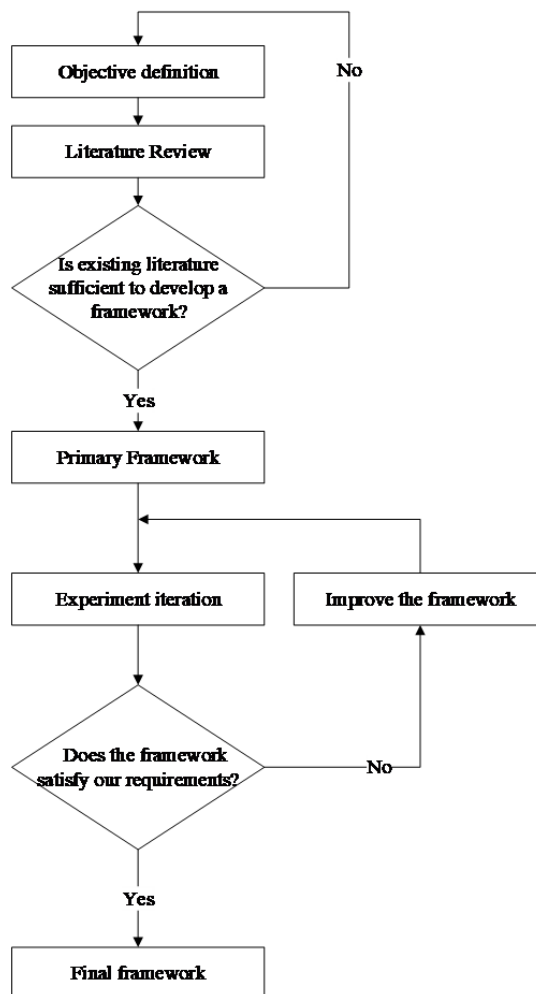


FIGURE 1.2 – Research Methodology

1.4. RESEARCH METHODOLOGY

The literature review was initially conducted with the objective of finding frameworks related to the topic of our discussion. Then, due to the lack of literature on this issue, it was decided to set another goal to give a direction to the literature review that will help in reaching a suitable framework. This objective is to examine the evolution of MMs in the context of Industry 4.0. A literature review with this aim assists in analyzing potential requirements due to the emergence of Industry 4.0 and its related developments. As a result, important aspects to consider for the integration of MMs can be realized. Thus, the literature review with these analyses will be useful in creating a suitable framework for the integration of MMs in 4.0 industrial environments.

To systematically review the developments of MMs in the context of Industry 4.0, the methodology was constructed in a multi-staged manner :

1. Preliminary Search Strategy

The research began by querying key databases, such as Scopus, IEEE, Google Scholar, and ScienceDirect, employing specific search strings. These strings contained terms such as “Mobile Manipulators”, “Industrial Applications”, “Industry 4.0”, “Robotics”, and “Automation”.

2. Segregated Literature Review

From our initial search, the literature falls into two categories :

- Industry 4.0-focused : These articles predominantly discussed the core concepts and facets of Industry 4.0 but might not explicitly mention MMs.
- Mobile Manipulator-focused : Papers that discussed the evolution, functionalities, and challenges of MMs, potentially without linking them directly to Industry 4.0.

3. Analysis of MM Applications in Industry

For the studies that delved into MMs, a key area of focus was understanding their applications across various industrial sectors.

4. Synthesis of Industry 4.0 Recommendations for MMs

From the Industry 4.0-centric literature, the principal areas that point to potential directions for MMs have been filtered.

5. Exploration of MMs

MM-centric papers were reviewed from historical and emerging challenges to chart their progression through time.

6. MMs in the Context of Industry 4.0

After separate investigations, an integrated analysis to understand how MMs are reshaped by Industry 4.0 paradigms was performed.

The effectiveness of this approach, compared to other methodologies, is to identify gaps related to the widespread adoption of MMs in Industry 4.0 and highlight areas that need more research. The results of this review research are presented in Chapter 2 and have been published in the journal of Sensors[9]. Also, chapter 3 explains the final framework that has been published in the Journal of Robotics and Autonomous Systems [10] on the base of the primary framework which is published in Procedia CIRP [8]. The detailed organization of the rest of this thesis is presented in the following section.

1.5 Structure of the rest of the thesis

The following work is divided into five chapters, the first of which is this introduction. In the previous sections, the industrial context and the problem underlying the research work were presented. The purpose of the study was clarified, as well as the hypotheses that frame the research project. The rest of this thesis is organized as follows :

Chapter 2 provides a brief overview of Industry 4.0, CPSs, and Integration followed by an overview of automation and industrial robotics, a brief overview of collaborative robots and mobile robots to the introduction of their combination (MMs). It also reviews MMs in industry and their industrial applications, and highlights the contributions and shortcomings of previous research in the context of Industry 4.0, preparing the readers to find gaps or limitations of the existing research.

Chapter 3 describes the approach and methodology employed in the framework's development. It details the development and design of the framework for integrating MMs into production systems.

Chapter 4 presents the experiments conducted at platform 4.0 to validate the proposed framework.

Chapter 5 summarizes the entire study and highlights the main findings and contributions of the research. It acknowledges any limitations or shortcomings of the research and proposes future directions for further research in this field, suggesting potential improvements or extensions to the framework. It also presents incomplete research due to lack of time.

Chapitre 2

State of the art

content

2.1	Overview of Industry 4.0	36
2.1.1	Cyber-physical systems : The core of Industry 4.0	37
2.1.2	Integration and interoperability	40
2.2	State of the art in automation and industrial robotics	42
2.2.1	Robotics over time : new features and the shift to modern integration	42
2.2.2	Mobile manipulation : From research to industry	46
2.3	Conclusion	74

2.1 Overview of Industry 4.0

Manufacturing has undergone many changes over time, including concepts and technologies used, and even economic and social aspects. There are four eras that the changes are more specified, referred to as the industrial revolution. The first industrial revolution is the start of mechanization of the operations by means of water and steam power. In the second industrial revolution, mass production powered by electricity was introduced. Automated production using information technology and electronics rose in the third one, and the fourth industrial revolution improved the digitalization aspect of the previous one. The concept of the Fourth Industrial Revolution was coined by the German Federal Ministry of Education and Research as the term “Industrie 4.0” in 2011. In his book with the same name, Klaus Schwab defines Industry 4.0 as follows : “The Fourth Industrial Revolution creates a world in which virtual and physical systems of manufacturing cooperate with each other in a flexible way at the global level” [11].

Three of its key traits are digitalization, data interchange, and automation. As a result, Industry 4.0 has made it possible for various types of automation in production facilities with the goal of enhancing work processes and maximizing productivity. Figure 3.3 shows the stages in the industry 4.0 development path, provided by FIR eV at RWTH Aachen University as a tool for evaluating maturity to help the enterprises transformation to industry 4.0 (Acatech 2017, courtesy of FIR eV at RWTH Aachen University). Technically, industry 4.0 can be defined as the increase of the digitization and automation level of a manufacturing system and the development of a digital value chain to allow contact between products, their environment, and business partners [12]. The digitalization of a company is seen as a prerequisite for enterprises to participate in the fourth industrial revolution as Amaral et al. [13] presented case studies to show the important role of increasing digitalization level in stepping on the path of industry 4.0. However, they believed that any kind of digitalization could not lead an enterprise into the industry 4.0 transformation. Digitalization needs to occur based on industry 4.0-based design.

Komenda et al. [14] proposed a practical guide to digitalization and CPPS safety strategies based on a use-case of human-robot collaboration. Li et al. [15] and Böhner et al. [16] explained the importance of learning factories to be integrated with digital technologies and provided a showcase to demonstrate this integration. Ghobakhloo [17] defined and evaluated the eleven determinants that

2.1. OVERVIEW OF INDUSTRY 4.0

affect smart manufacturing's deployment of information and digital technologies (IDT). Also, clarified the complicated precedence between them illustrated in Figure 2.1.

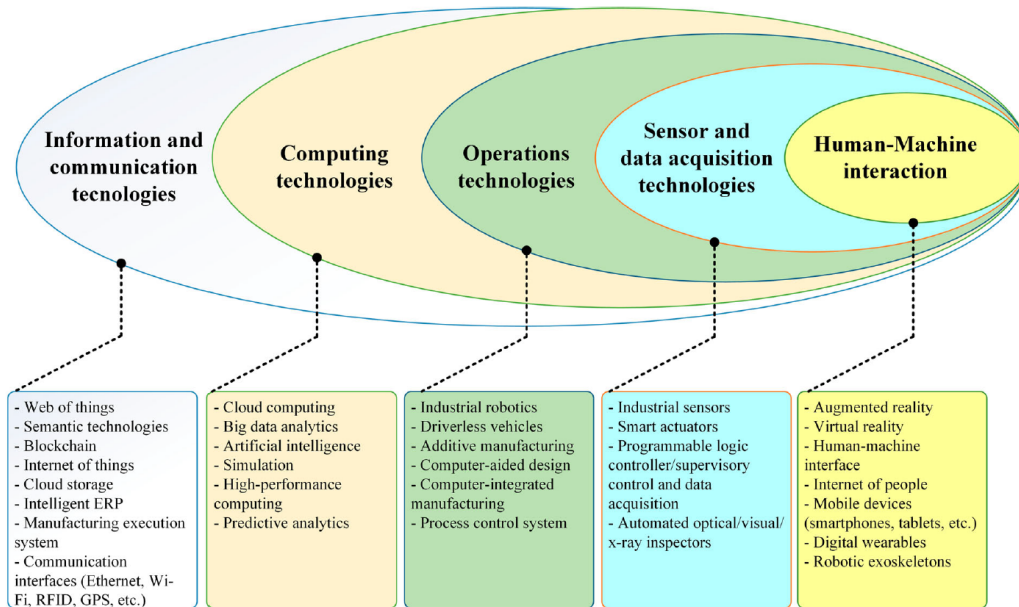


FIGURE 2.1 – information and digital technologies in smart manufacturing adapted from Ghobakhloo[17]

2.1.1 Cyber-physical systems : The core of Industry 4.0

A CPS is the integration of communication, control, and computational cyber systems into the physical world [18]. The goal of the CPS in Industry 4.0 is to provide tools to facilitate the integration of the physical and virtual worlds, where embedded systems that are networked together track and manage physical processes while also manipulating information processes. Embedded systems are computer hardware systems that contain software embedded in it. These systems are also microcontroller-based, software-driven, reliable, real-time control systems with a single function, and tightly constrained characteristics. The difference between embedded and CPSs is the scale, scope, and vision [19]. Various embedded sensors are networked in CPS to detect, track, and actuate real-world physical components [20].

Rodić et al. [21] presented a modern smart CPS that is specifically intended to increase the flexibility of manufacturing processes and the collaboration capacities of industrial service robotics designed for cooperative work with humans in a knowledge-organized workspace. Jazdi [22] sees industry 4.0

as simultaneous use of CPS, IoT, and services and believes that to extend an embedded system to a CPS, an interconnection through the internet or a similar network is required. Monostori et al. [20] present a maturity model based on five defined levels : Setting basics, creating transparency, increasing understanding, improving decision-making, and self-optimizing, as shown in the CPS maturity model adapted from Monostori et al. Figure 2.2. “General conditions” are the basic infrastructures for CPS execution. The term ”information generation” refers to the need for real-time data availability in all CPS operations. The term ”information processing” refers to the current tools for aggregating data in order to obtain new knowledge. ”Information linking” applies to collaboration-based CPS mechanism adaptation. At the same time, ”Interacting cyber-physical networks” is the most advanced dimension that can only be solved through collaborative CPS’s autonomous problem-solving capability.

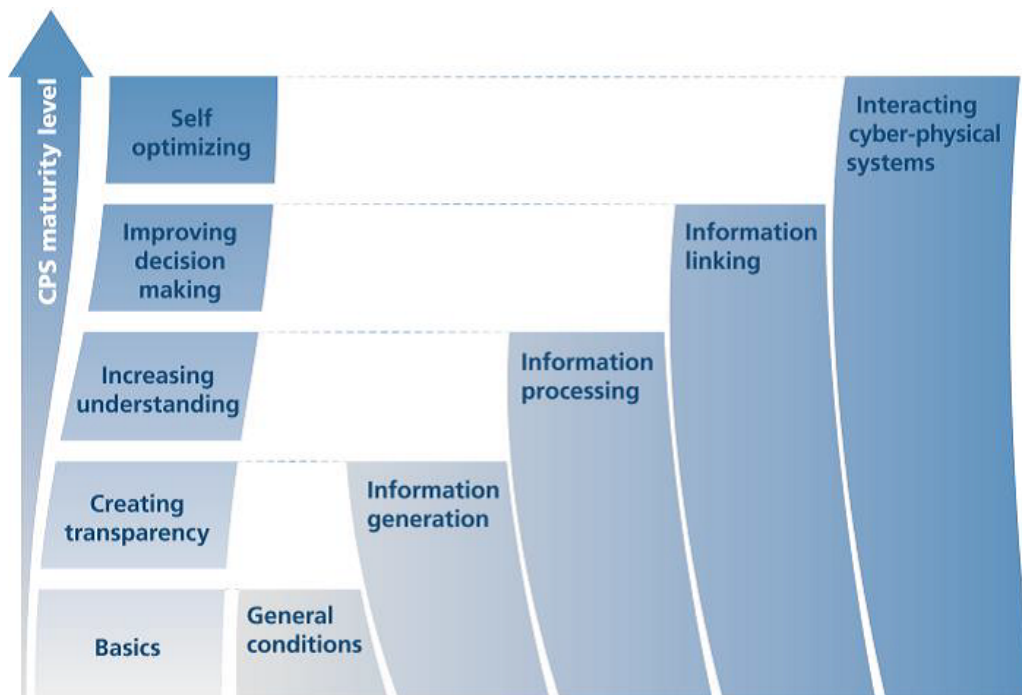


FIGURE 2.2 – CPS maturity model adapted from Monostori et al.[20]

Wan et al. [23] discussed the connections between the characteristics of machine-to-machine (M2M), wireless sensor networks (WSNs), CPS, and IoT, and they suggest that under the IoT architecture, CPS is an extension of M2M, so it is possible to upgrade M2M to achieve a CPS by giving them autonomy in control and decision-making capabilities. Cyber-Physical Production Systems (CPPSs) are the application of CPS in all stages of production, from intelligent machines, to production processes,

and logistic systems. CPPSs, which depend on the most recent and imaginable innovations in computer science, information and communication technologies, and manufacturing science and technology are constituent parts of the 4th Industrial Revolution [24]. Lins et al. [25] provided standardization for the modernization of old equipment and converted them into CPPSs based on the Reference Architectural Model for Industry 4.0 (RAMI 4.0). Kuhnle et al.[26] examined the potential applications of Machine Learning (ML) algorithms, especially Reinforcement Learning (RL), and found out that CPPS can help to improve operational performance using data-driven algorithms with the real-time data provided by CPPS.

The 5C architecture is a guide for the design and implementation of a CPS for industrial applications proposed by [27]. The levels of this architecture are as follows and also shown in Figure 2.3 :

1. Connection : The first step is to connect physical devices such as machines, their sensor, and actuators through a communication network and make sure to obtain correct and trustworthy data. This data might have different sources, sensors, or enterprise controllers such as MES, through some data transfer protocols.
2. Conversion : In the second step, it is necessary to obtain valuable information from the data. This way, self-awareness of the machines can be provided.
3. Cyber : In this stage, where the digital twins are shown, all the machines are connected to a central hub, so there is a capability for the analysis of the performance of all the components. This way, one machine that became self-aware in the previous step is now able to be compared with other machines and also with its previous performances to become self-compare.
4. Cognition : In this level, the conversion of information into knowledge is happening. Analyzing the information obtained from all the machines and individually can lead the management to develop a decision support system.
5. Configuration : This level is responsible for transferring feedback from cyber to physical space and leads the machines to be self-configure and self-adaptive.

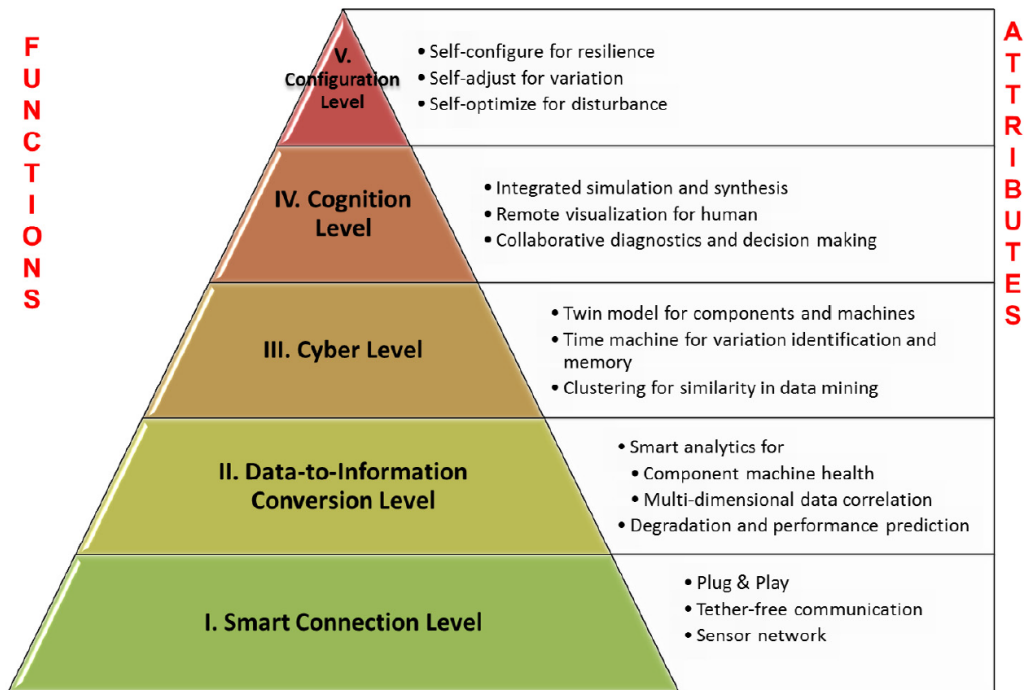


FIGURE 2.3 – architecture for implementation of CPS adapted from J. Lee et al.[27]

2.1.2 Integration and interoperability

Interoperability and integration are two of the key principles of I4.0 [28]. Various interoperability frameworks are suggested, including ATHENA [29], C4ISR [30], and EIF [31]. The successful integration of different technological bricks in a 4.0 production system is a major challenge in order to benefit from new functionalities or to reach higher performances. However, it should be noted that the integration process is often complex and requires significant preparatory work. This is usually due to incompatibilities between the production control systems and the operating systems of the technological bricks. In addition, some companies that develop 4.0 technology bricks limit access to operating systems and do not consider existing systems. They often propose powerful technological bricks but strongly limit access to data.

Integration of data and information to provide availability of the interconnection between system components depends on the capability of information integration, interoperability, and interchangeability [32]. Industry 4.0 offers to connect different components of the system in an integrated way. Lu [33] believes that industrial automation, as one of the major concerns of the industries, has an effect on industrial integration, including technologies and resources. The integration process brings together

2.1. OVERVIEW OF INDUSTRY 4.0

new technologies, manufacturing concepts, and business processes. With the complexity growth of the automation systems, the need for more efficient integration increases.

Modern digital integration that allows for real-time data collecting from the physical world and information output from cyberspace, as well as the ability for intelligent data processing, analysis, and computing that makes up cyberspace, are the two main technological components of a CPS. Bangemann et al. [34] especially emphasize the gap between modern technologies, which come with the term “cyber-physical systems,” and the company’s classical tools. Based on it, they provide a three-dimensional view of integration within classical automation. As shown in Figure 2.4, these three are enterprise, product lifecycle, and supply chain dimensions. Collecting and transferring accurate and trustworthy data to other equipment or exchanging data with high-level corporate systems like Enterprise Resource Planning (ERP) or MES, among others, is crucial for the development of a CPS. It is necessary to use appropriate communication protocols, such as TCP/IP, OPC UA, and others, for this purpose. These protocols should be evaluated for factors such as data quantity, transfer speed, reliability and stability, accessibility, power consumption, compatibility, number of linked devices capacity, security, effortless integration, and long-range accessibility.

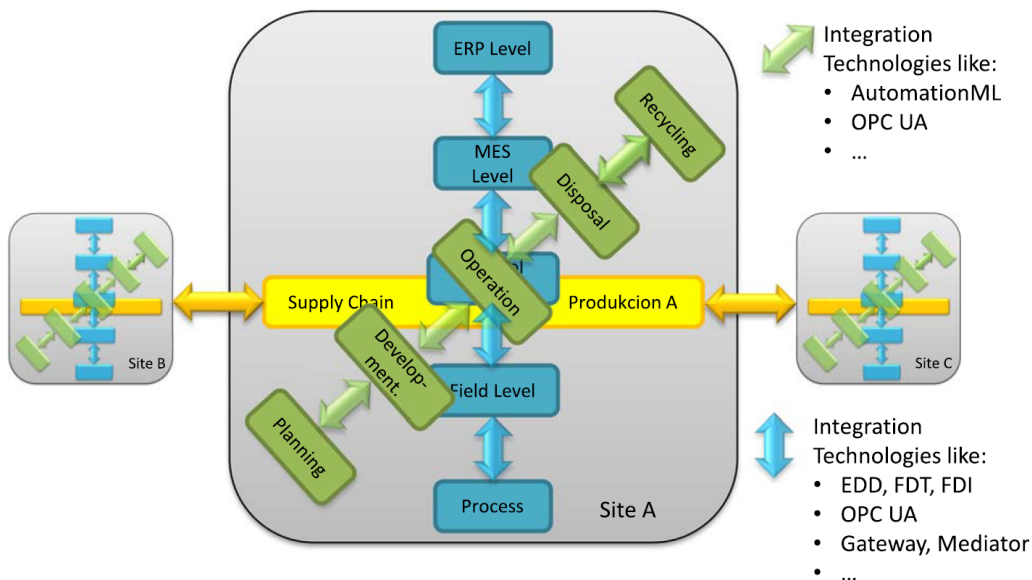


FIGURE 2.4 – Dimensions of integration adapted from Bangemann et al.[34]

Chen et al. [35] give another classification for enterprise integration : physical integration, application integration, and business integration. Physical integration considers the interconnection between

physical components such as CNC machines, robots, sensors, actuators, etc., through computer networks.

2.2 State of the art in automation and industrial robotics

With the use of automation and industrial robotics, the flexibility of production can be achieved. There are different types of robots that can help industries to improve their performances. Robotics is a multidisciplinary field that combines mechanical, electrical, and computer engineering, as well as communication and networking, artificial intelligence, sensors, and material technology. It is expected that cutting-edge technologies will lead the robots to the next generation in the 4.0 version by giving them more advanced characteristics in terms of collaboration, perception, and autonomy. Authors [36] believe that Robot Operating Systems (ROS), integrated drive systems, sensors, communication, human-robot natural interaction, and deep learning are the crucial technologies that help industrial robots be more collaborative, accurate, and autonomous.

2.2.1 Robotics over time : new features and the shift to modern integration

As the industry experienced different revolutions, different versions of robotics appeared over time. According to Gao [36], the first generation was created to avoid repetitive and tiring tasks for humans ; With the use of servo motors, controllers, and motor drives (Motorization). In the second version of robots, the vision was added utilizing different types of sensors and cameras. In addition, getting information and receiving feedback enabled a new robotic application. Robotics 3.0 is a digital version of robots. It is seamlessly connected, accurate, and with more data exchange capabilities. In this version, the concept of Industry 4.0 affects the characteristics of robots by leveraging some technologies such as the IoT. Human-machine collaboration, the concept of CPSs in robotics [37], and digital twins for robotics are some examples mentioned in the third era of robotics (digitalization). The era of robotics 4.0 is believed to have begun in the 2020s. It focuses on cloud-based control and tries to provide more natural interactions between machines and between humans and robots. This era is growing the idea of integrating artificial intelligence and the IoT to develop multi-source data usage and enhance the quality of human-robot interaction (collaboration and cognition). The different levels of robotics can be summarized as shown in Figure 2.5.

2.2. STATE OF THE ART IN AUTOMATION AND INDUSTRIAL ROBOTICS

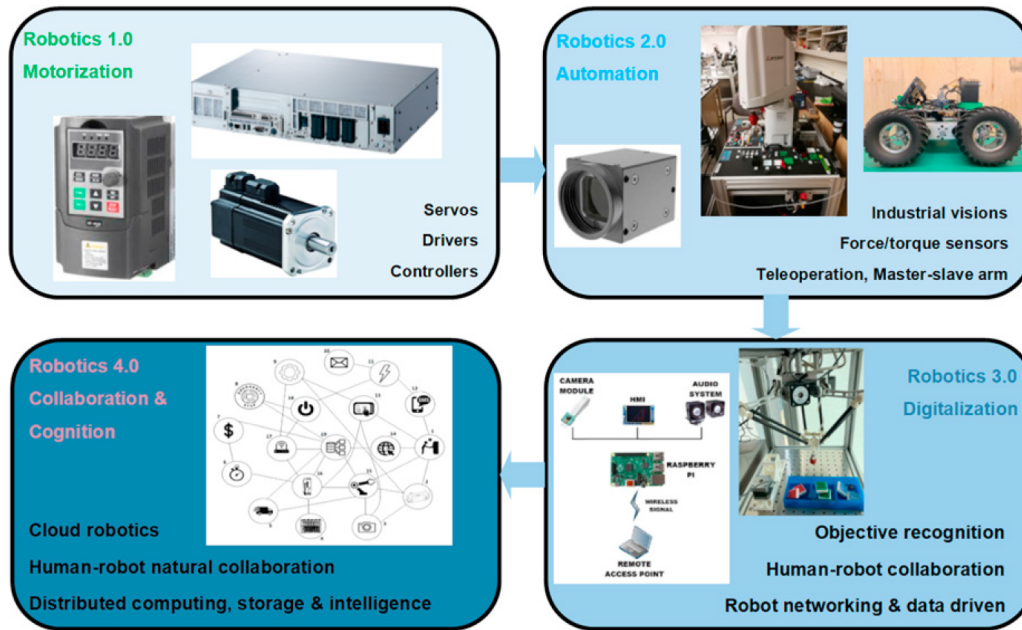


FIGURE 2.5 – From Robotics 1.0 to 4.0 adopted from[36]

Another classification of robotics is divided into industrial robotics, collaborative robotics, and service robotics according to [38]. The first types of robots were built to help with different production technologies. They can have three or more degrees of freedom, and based on the kinds of their joints, they are suitable for special applications. Nevertheless, usually, they work in isolated workstations.

The transition from conventional industrial robots to collaborative robots is one of the most effective shifts in developing the flexibility and performance of factories. Thanks to collaborative robots, the interaction between humans and robots took another form. A safe area is provided for the human operators and robots to efficiently work together as two honest colleagues. The first collaborative robot, the cobot, was invented by J. Edward Colgate and Michael Peshkin in 1996 [39]. Furthermore, they believed that cobots have much potential for physical contact between humans and computers, which can be helpful in material handling processes. Also, they predicted to use of the cobots' virtual surfaces as a tool in surgery using images and touch screens where you can feel the surface of a CAD model [40]. Gradually, large companies in the field of robotics began to build collaborative robots. KUKA, one of the first robotic companies, produced their first cobot, called LBR 3, in 2004. UR5 was introduced in 2008 by another great company, Universal, to automate CNC machines. The YuMi collaborative robot from ABB was first introduced to the public in 2015. YuMi is not the first cobot,

but it is the first with a dual-arm design. Also, in 2015, FANUC launched its first collaborative robot, the CR-15iA. Moreover, Panda from Franka Emika is another seven-degrees of-freedom lightweight collaborative robots. After introducing their first generation, most of the companies developed more complicated cobots with various functionalities. Thus, there are many possibilities to choose from for each enterprise wishing to be equipped with cobots. Ferraguti et al., [41] proposed a methodology to help the decision-makers benchmark the different types of cobots based on necessary parameters and characteristics.

Collaborative robots can offer some advantages rather to traditional industrial robots. They can increase the level of automation in a highly safe environment for human cooperation. Also, due to the lower price of collaborative robots compared with industrial robots, and also, a higher level of flexibility, they can provide a return on investment faster. Another notable benefit of collaborative robots is that they are very mobile and adaptable, and they do not require explicit programming, making them perfect for multitasking. Collaborative robots have these characteristics, making them highly compatible with Industry 4.0's norms and aim [42]. Even it is possible to offer a qualitative pilot user research in which a collaborative robot meets an assembly worker with cognitive impairments and interdisciplinary specialists in the context of regular assembly tasks. J. Kildal et al, [43] created design criteria for such cells and compared them to design requirements for a typical workforce.

Malik Bilberg [44] proposed a systematic methodology for deploying cobots in existing assembly cells for increased productivity, based on Roozenburg's engineering design cycle. The authors offer a methodology for establishing evaluation parameters for a cobot. The use of virtual simulations in validating and optimizing the human-robot work environment is explored. Their proposed framework is shown in Figure 2.6.

2.2. STATE OF THE ART IN AUTOMATION AND INDUSTRIAL ROBOTICS

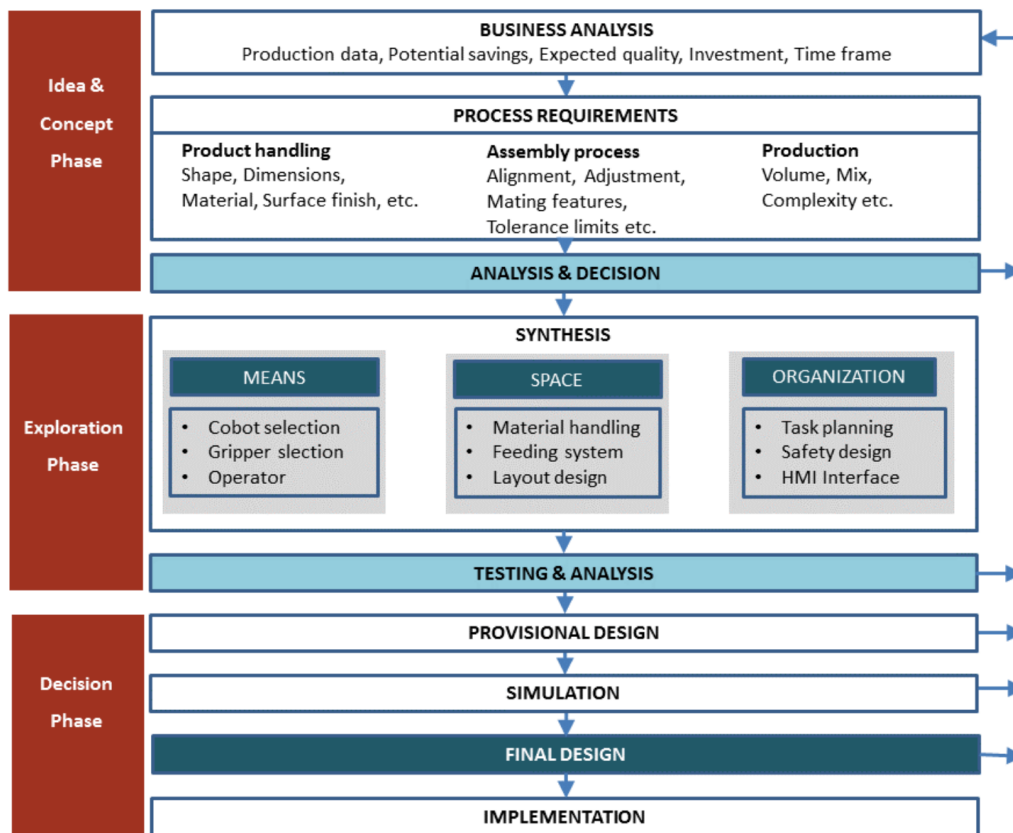


FIGURE 2.6 – framework for implementation of collaborative robots by[44]

Although fixed robots can be accurate and fast for some operations, they do not necessarily bring flexibility to the production line. Collaborative robots with high degrees of freedom are more flexible for different types of tasks, still, the mobility of the robots can bring other kinds of flexibility to the manufacturing process.

Automated Guided Vehicles (AGVs) are designed specifically for the purpose of autonomous transportation and material handling within a controlled environment. AGVs typically operate in predefined paths or routes, often guided by physical markers or wires embedded in the floor or through the use of sensors for navigation. They are programmed to follow a specific route, stop at designated locations, and perform tasks such as picking up or dropping off items. AGVs are often used in manufacturing plants, warehouses, and distribution centers to transport materials, components, or finished products. They are commonly employed for repetitive tasks, such as moving goods between assembly lines or delivering pallets to storage locations. AGVs are known for their efficiency, reliability, and precision

in performing these transportation tasks.

Autonomous Mobile Robots (AMRs), on the other hand, are designed to operate autonomously in dynamic and unstructured environments without the need for physical guides or markers. AMRs leverage advanced perception and navigation technologies, including cameras, LIDAR, and other sensors, to perceive their surroundings, map the environment, and make decisions based on real-time data. Unlike AGVs, AMRs have the ability to adapt to changing environments, avoid obstacles, and plan optimal paths dynamically. They can navigate through complex layouts, handle uneven surfaces, and interact with their surroundings using robotic arms or grippers. AMRs are often equipped with advanced capabilities such as Simultaneous Localization And Mapping (SLAM), obstacle avoidance, and human-robot collaboration features. AMRs find applications in various industries beyond manufacturing and warehousing, such as healthcare, hospitality, and retail. They can perform a wide range of tasks, including but not limited to material handling, inventory management, inspection, and even customer assistance. AMRs offer flexibility, versatility, and adaptability, making them suitable for scenarios where the environment or task requirements may change frequently.

By integrating a collaborative robot into a mobile platform, more flexibility can be achieved. This combination is usually referred to as mobile manipulators (MMs).

2.2.2 Mobile manipulation : From research to industry

Basically, MMs consist of one or multiple robotic arms mounted on the top of a mobile platform. The system is surely equipped with proper sensors, actuators, and tools, enabling the MM to move according to surroundings safely and autonomously and perform a task based on the selected tool for the end-effector of the arm. MMs can be designed for special functionalities by adapting their size, shape, payload, mobility, tools, and other characteristics. They are designed to work in special environments that can be on the ground (indoor or outdoor, for smooth or turbulent rout), aerial, or underwater. They can be designed to move sensitive small objects or huge ones for big constructions. Mobile platforms could be legged or wheeled. Wheeled is more common and can be omnidirectional, holonomic, or nonholonomic. MMs are gradually establishing their position for numerous applications such as in agriculture, military, nuclear, space, mine, healthcare and assistive, domestic, search and rescue, and industrial fields. The primary focus of this article is on industrial applications however, some of the solutions in other areas have been addressed within some of the projects that are discussed

2.2. STATE OF THE ART IN AUTOMATION AND INDUSTRIAL ROBOTICS

in the following.

S. Bøgh et al, [45] provided an overview of existing MMs from the first prototype in 1984 (MORO) until 2010 (Figure 2.7). Nevertheless, the origins of MM creation may be traced back even further to Stanford Research Institute, which developed SHAKEY from 1966-72 [46]. Following the overview presented in Figure 2.7, the intention is to introduce more recent (Figure 2.8) projects that have contributed to the progress of MMs since 2010 and map and review the findings of each one in related sections.

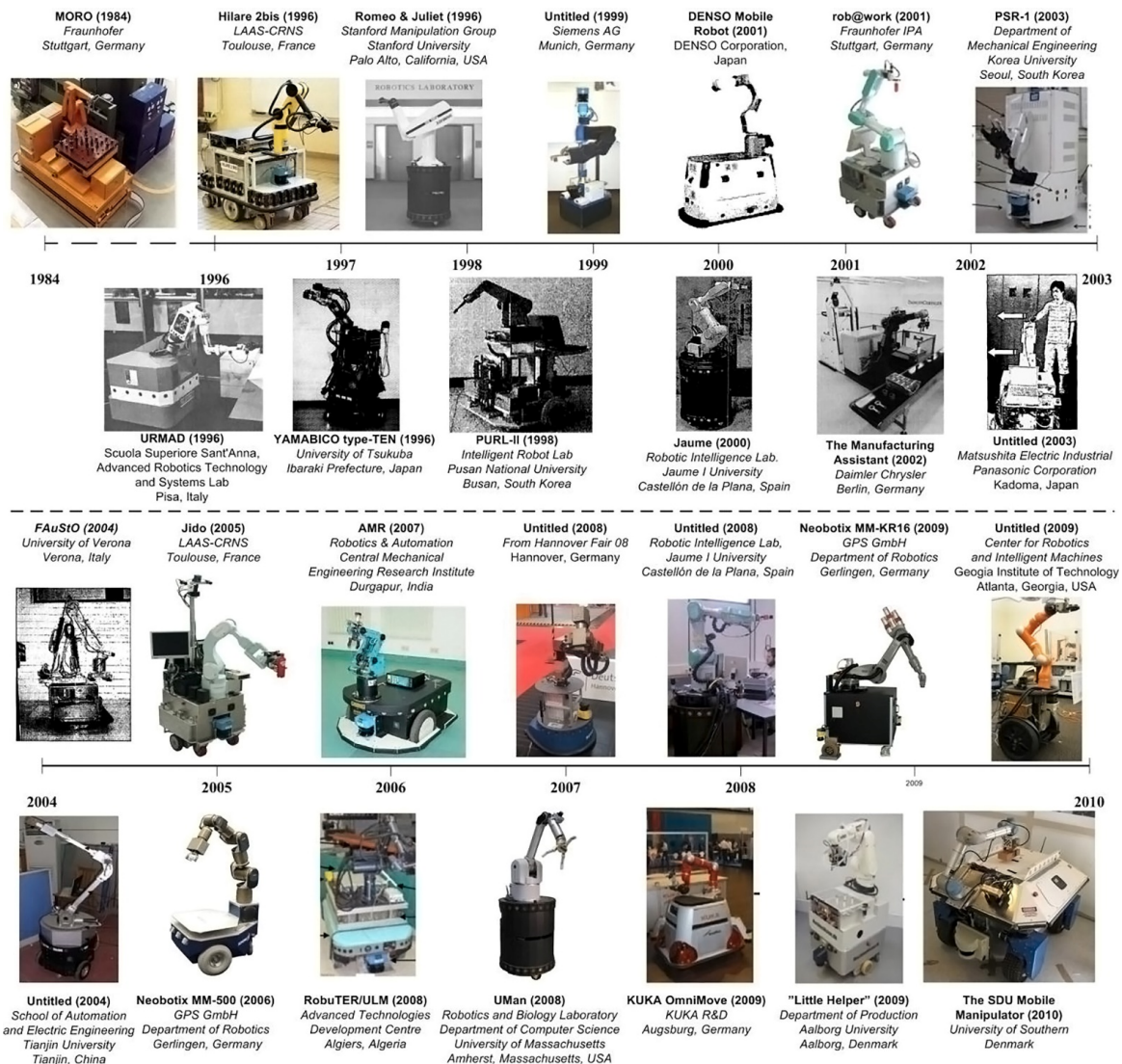


FIGURE 2.7 – Timeline of existing MMs from 1984 to 2010 adopted from [45]

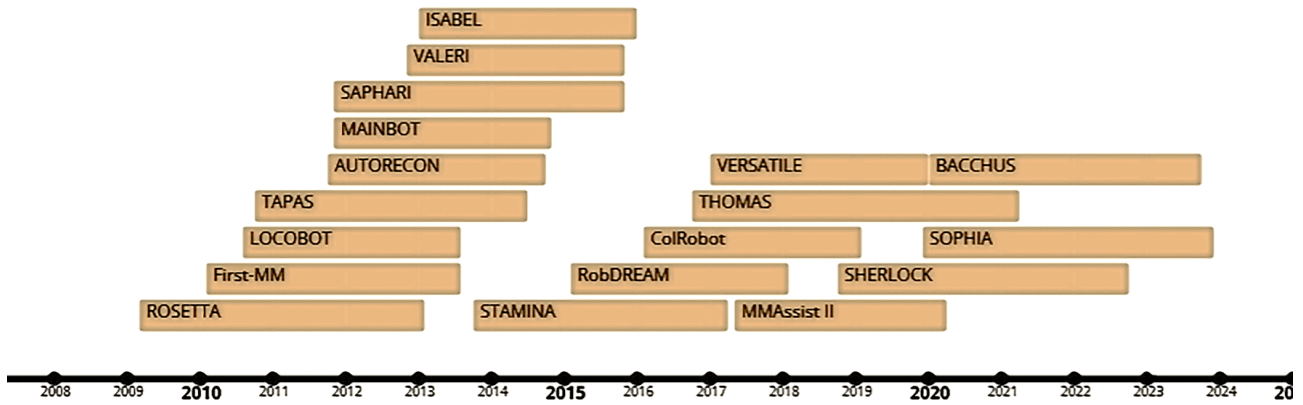


FIGURE 2.8 – a time line of different projects contributed to MM developments

Especially today, there is a close relationship between scientific research and the needs of industries. Sometimes the needs of the industry cause the creation of projects for scientific investigation and finding innovative ways and the feasibility of each of them. Sometimes progress in science leads to finding solutions that were not even thought of before, while they help to improve the condition of factories. However, companies are more conservative in employing some novel solutions due to a variety of factors, including significant investment costs, the need to modify an existing and successful system, etc. A crucial step in making MMs more prepared for serious entrance and widespread adoption in industries is the integration and implementation of MMs in laboratory settings or real production systems.

S. Bøgh et al,[45] suggested some elements as an infrastructure of integrating MMs into the manufacturing systems. They believe that finding a common language between academia and industry is a vital infrastructure. The New Concept Development (NCD) is an approach to achieve it. Regarding this model, based on the main strategic objectives, different opportunities can be identified and analyzed to help select the best of various ideas that address each opportunity. Then the concept and development of the required technology can be achieved. They suggested a Technology Push Manufacturing Technology (TPMT) model to help identifying potential opportunities and their analysis. These methodologies can lead us to find the best applications for new technologies such as MMs. After this

2.2. STATE OF THE ART IN AUTOMATION AND INDUSTRIAL ROBOTICS

application finding, it is suggested to define modules and skills for MMs because a modular system can provide more flexibility. To showcase the practical applications of our selected technologies in real-world settings, it is recommended to employ a breakdown approach wherein smaller demonstrations are conducted instead of a single comprehensive demonstration that may take an extended period. This approach allows for a more focused and targeted display of our technologies' capabilities, enabling our audience to better understand their potential benefits in specific contexts. A representation to achieve proper infrastructure for MM integration is shown in Figure 2.9.

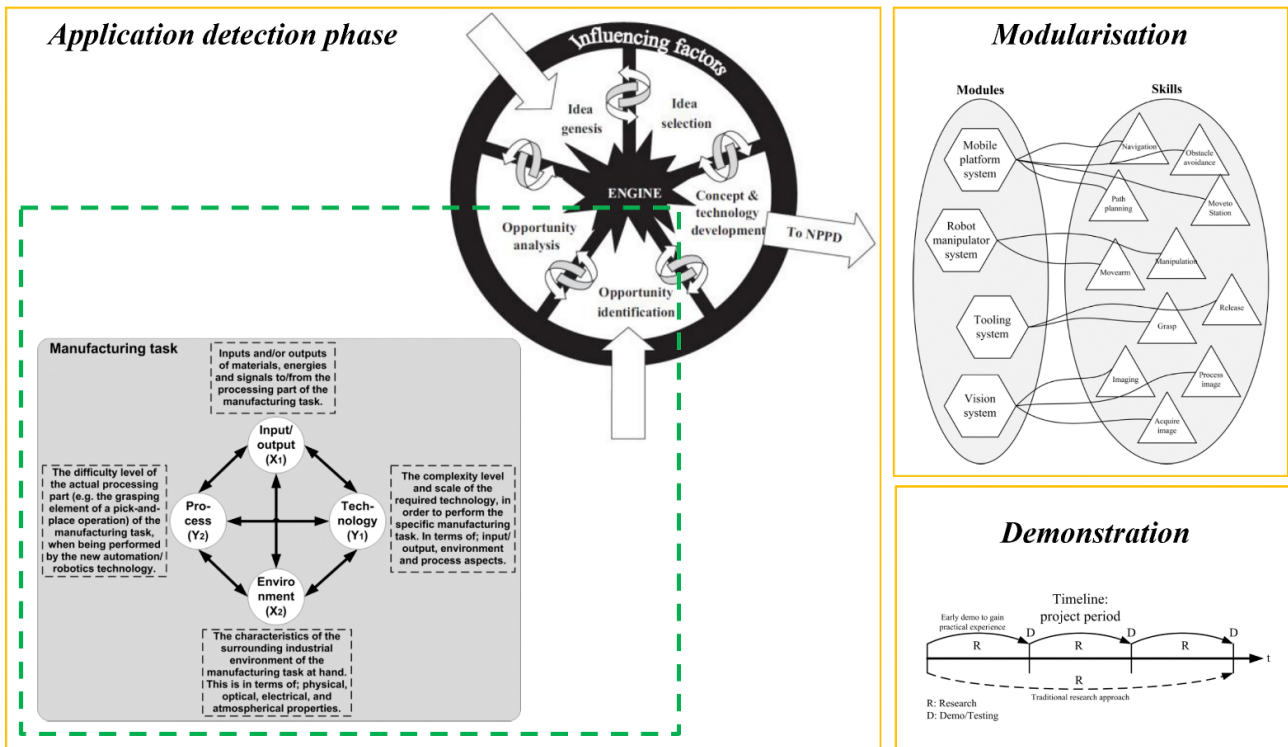


FIGURE 2.9 – A representation to achieve proper infrastructure for MM integration inspired by [45]

2.2.2.1 Mobile manipulators for industrial applications

Similar to traditional industrial robots, MMs often find use in non-added value tasks, filthy, and/or hazardous, with the added advantages of increased operational flexibility, expanded workspace, and enhanced overall equipment effectiveness. S. Bøgh et al, [?] investigated MMs as industrial assistance and classified their applications into logistics, assistive, and service applications (Table 2.1).

2.2. STATE OF THE ART IN AUTOMATION AND INDUSTRIAL ROBOTICS

TABLE 2.1 – Classification of MM Industrial Applications

Mobile Manipulators Applications		
Assistive Tasks	Logistics Tasks	Service Tasks
Machine tending	Transportation	Maintenance, Repair and Overhaul (MRO)
Assembly/Pre-assembly	Part feeding (multi)	Cleaning
Inspection	Part feeding (Single)	
Process execution		

The results of their analysis of MM suitability (in their case LHs) for 566 manual manufacturing tasks from five factories are presented in Figure 2.10, which shows that logistics, specifically transportation and part feeding, have the highest potential for immediate implementation of MM technology.

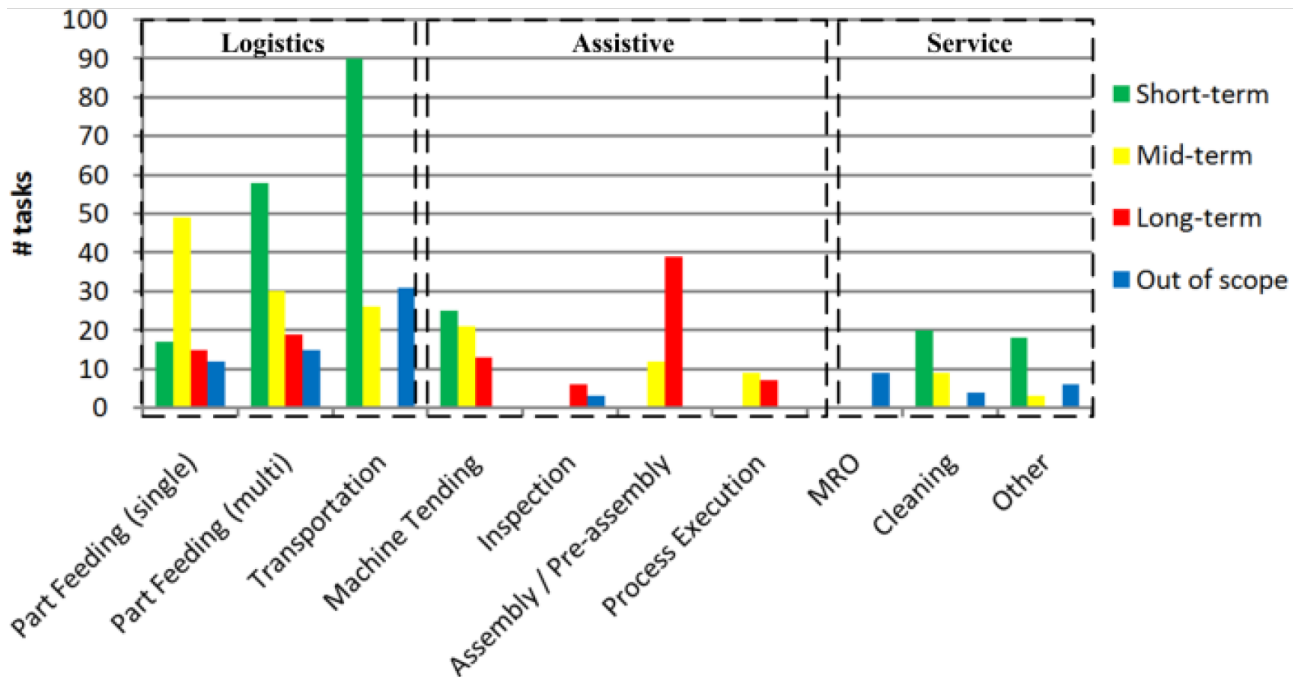


FIGURE 2.10 – Suitability of utilizing MMs for each class of industrial operations

2.2. STATE OF THE ART IN AUTOMATION AND INDUSTRIAL ROBOTICS

For industrial settings, one of the known MMs called Little Helper (LH) that has 7 different versions [47] developed at Aalborg University (Figure 2.11). The project TAPAS includes real-world experiments with MMs, such as LH and omniRob, to assess the technology's readiness for industrial application and their scheduling problems [48]. S. Bøgh et al, [49] believe that MMs are finding their way to more assistive tasks instead of the traditional logistic ones. Thus, they integrated two different types of MMs (LH 3 and omniRob) to collaborate with each other. LH takes part in the assembling operation of rotors and the omniRob deployed for logistics (Figure 2.13) at Grundfos. The duty of scheduling and task planning of the MMs is up to a central mission planner and controller (MPC). The important considerations are cycle time, the traveling time of robots (however, they found it hard to detect only the traveling time, thus, they measured a combined average time), their capacity, and manufacturing goals. On the other hand, the environmental information provided by MES as an input to the MPC (Figure 2.12). For their experiments, the main initial steps they defined are listed as follows : setting up MMs, setting up and verifying communications, workstation adjustment, navigation setup, programming, and testing. Most of the errors for both MMs were announced to be communication failures, and manipulation tasks, and their most serious challenges in safety, integration with the existing production system, communication problems, and lack of error handling after losing connection.

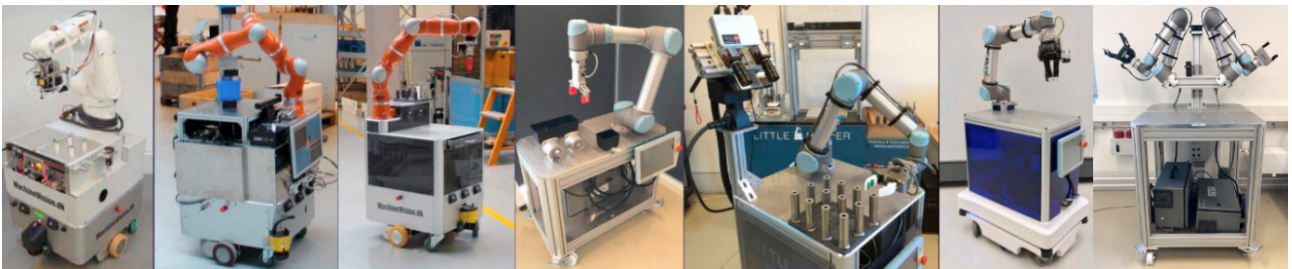


FIGURE 2.11 – Little helpers from first generation to the seventh one (from left to right) adopted from [47]

O. Madsen et al, [50] also covered the simultaneous implementation of two MMs to assist in SQFlex pump production at Grundfos. They relied on skill-based programming and employed the same mission planner system for parallel navigation of both MMs but without mentioning MES presence. Performance, user-friendliness, and economic efficiency were the criteria to help them finding the gap between current solutions and the demands of the users. As a result, a cycle time of more than 20

times longer than for human’s observed, as well as a total downtime of 58 minutes in a half work day due to navigation, assembly process, and communication errors. They analyzed the reason for the long cycle time as related to limitations in its scenario, utilization, dexterity, and ability to perform simultaneous quality control. The main challenges they faced were about safety, robustness, cycle time, and reconfigurability and flexibility of MMs and environment.

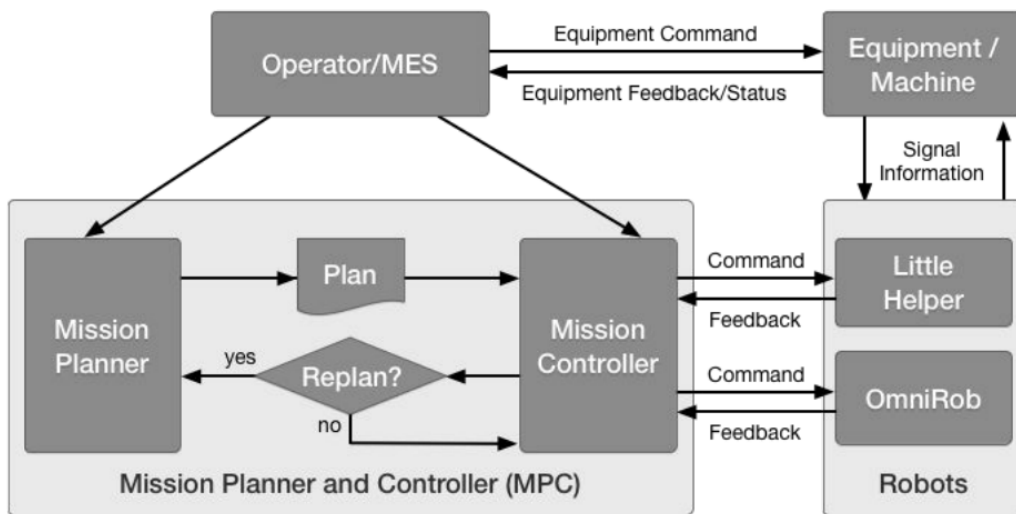


FIGURE 2.12 – The controlling system proposed by [49] for integrating MMs into production systems



FIGURE 2.13 – Little Helper 3 from Aalborg University (Left) omniRob from KUKA (Right)

I. Nielsen et al, [51] proposed a methodology to implement MMs into cloud manufacturing flexible

environments. Their methodology starts with the design of MMs. Flexibility, modularity, standardization, autonomy, and dynamic nature were the key indicators to choose the LH for their demonstration. Next, they suggested a multiple-part feeding application. Then, the scheduling problem of the MMs is highlighted with mathematical modeling in the concept of the Bartender problem. For MM control in the production environment, they have also adopted the MPC architecture (Figure 2.12). Finally for the real-world demonstration, they evaluated their methodology at the CR 1-2-3 impeller production site.

R. Eckholdt Andersen et al, [52], described the implementation of an LH6 that performs part feeding application with a skill-based system (SBS) at the FESTO cyber-physical factory. Iterative design was used to create the LH6 system. The offset of the mobile platform led to the robotic arm's imprecision, which was countered via a calibration technique. The module provided a TCP connection between SBS and the PLC, and two new abilities for calling and listening were developed for seamless integration with SBS. Five different aspects of a part-feeding task were evaluated, and after 25 test runs with 9 failures, it was determined that communication between the modules was the main execution bottleneck and that the mobile platform's errors were caused by navigational errors around a corner close to the target locations.

One of the other MM applications is concerned with the placement and co-manipulation of big pieces of tooling for precise procedures. According to the SOFITEC pilot case of Sherlock project [53], even though the carbon fiber components of today are not very heavy, a single person cannot manipulate them due to their vast size (up to 7m) and the distance between workstations. For its deployment, two people are often required, while one person positions the remaining instruments. The remaining employees only assist in following the leader and supporting the weight of the part, with only one operator adding value to the positioning process. The operators clearly work together to complete the assignment, employing force, visual, and speech modes to coordinate their actions. The use of dual arm MMs for placement and co-manipulation of massive composite aeronautics parts on precise process tooling has been investigated by [54] (Figure 2.14).

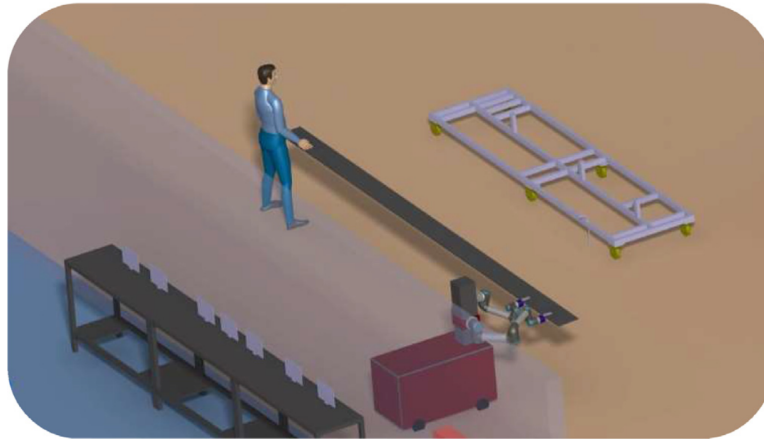


FIGURE 2.14 – Using MM to carry large parts with human cooperation adopted from[54]

Another scenario within the Sherlock project concentrates on the assembly line of solar thermal collectors at CALPAK [55]. The operator must put together various thermal collector variations that range in size and weight. The operator must have two-side accessibility while lifting and moving the bulky thermal collectors around to complete the installation. Throughout a shift, these taxing duties must be completed repeatedly. Together with a higher level of exhaustion, chronic pain issues like hand tendonitis and back difficulties are also produced for human workers. Sherlock proposed the usage of a high payload collaborative MM (Figure 2.15). As the operator focuses on small assembly tasks, the high payload robot manages the large payload. AI-enabled onboard sensing devices keep an eye on the operator’s movements, assuring appropriate assembly by examining the order of the various processes. Moreover, Augmented Reality (AR) visualization tools that show the operator what steps to do next in the assembling process are helpful.

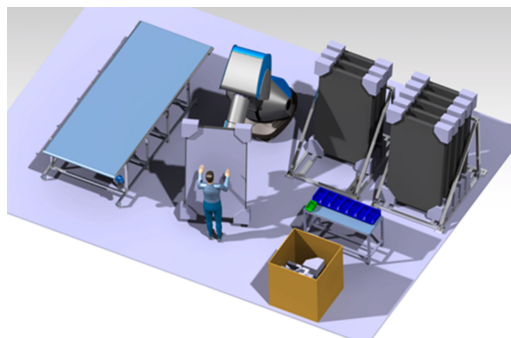


FIGURE 2.15 – assembly of solar thermal collectors adopted from

2.2. STATE OF THE ART IN AUTOMATION AND INDUSTRIAL ROBOTICS

The assembly of hydraulic pumps and the assistance of manual gas metal arc welding by use of the MM rob@work, are two applications that are discussed in [56]. Figure 2.16 presents MM applications of logistics and assembly at the Kuka manufacturing system (left), and collaborative assembly at Airbus (right) within the project SAPHARI [57].

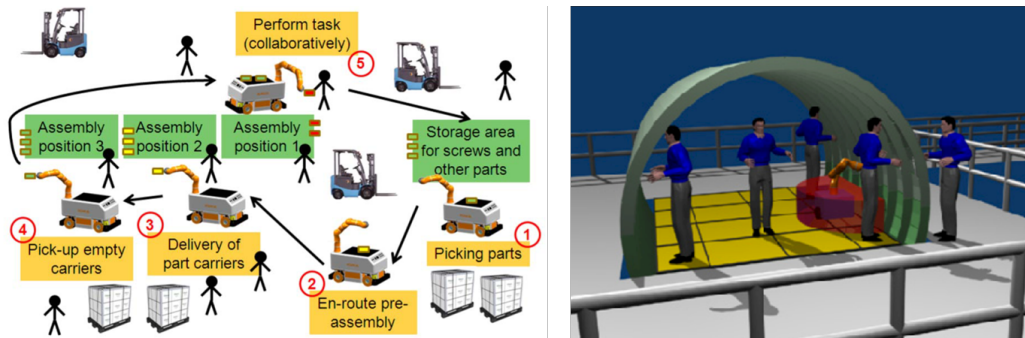


FIGURE 2.16 – 18 SAPHARI project : industrial applications required at Kuka (left) and aircraft assembly requirement of Airbus (right) adopted from [57]

The ColRobot project integrates advanced robot technology with the needs of users in assembly processes. By using an MM as a "third hand", the system can deliver kits, tools, parts, and hold workpieces while the operator performs their tasks collaboratively with the robot. Two use cases from the automotive [58] and aerospace [59] industries in real-world operating settings have been implemented and validated within this project. A ColRobot prototype (KMR IIWA : Figure 2.17) is presented and tested at ENSAM in [60] for kitting operations of THALES ALENIA SPACE France (TAS-F). Figure 2.18 shows the ColRobot prototype for fastener tightening and automatic refill in automotive industries [58].



FIGURE 2.17 – ColRobot prototype for aerospace industries (KMR IIWA) adopted from [60]



FIGURE 2.18 – ColRobot prototype for automotive industries adopted from [58]

BAZAR, a dual-arm MM has been developed at LIRMM (Laboratoire d’informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier) from 2016. It consists of two KUKA LWR4+ arms on the top of a Neobotix MPO 700 omnidirectional mobile platform and is presented in Figure 2.19. The VERSATILE EU project [61] aims to investigate the use of MMs in three industry-driven applications - assembly of vehicle dashboards at PSA, assembly of aircraft wing parts at AIRBUS, and handling and packaging of shaver handles at BIC. The BAZAR’s introduction and its assistance for a smart logistic use case have been presented in [62].



FIGURE 2.19 – BAZAR MM adopted from[62]

Fetch-and-carry operations in work spaces and settings shared with humans are being investigated in the collaborative ISABEL (Innovative Autonomous and Intuitively Operated Service Robot for Efficient Handling and Logistics) project, which is financed by the Federal Ministry of Education and Research. The ability to load and remove parts from machines, as well as autonomously choose and place items at stations, are priorities. In particular, "life science automation" and "semiconductor

manufacturing” are the applications for which this is being done. At Infineon, the ISABEL robot has undergone successful testing in a production setting. Wafer boxes could be effectively picked up, transported, and fed to equipment in the clean room (Figure 2.20) [63].



FIGURE 2.20 – ISABEL MM implementation for wafer box pick and place in clean room adopted from [63]

Due to its versatility in performing a variety of duties, such as inspection, monitoring, and repair, MMs can find their way into industrial maintenance. In this sector, some applications are required regarding the MAINBOT project including ubiquity sensing, leakage detection, and surface and interior equipment monitoring [64]. The MAINBOT project involves creating applications for service robots to independently carry out inspection activities on machinery that is organized either horizontally (using ground robots) or vertically (climbing robots) in large industrial plants. In order to achieve the project’s industrial goals, MAINBOT aims to use already-existing robots to implement creative solutions. Specifically, it wants to provide a way for measuring various physical parameters at various locations using autonomous robots that can navigate and climb structures, handle sensors, or use specialized non-destructive testing equipment [65]. The strategy used by MAINBOT to accomplish scientific and industrial goals entails analyzing maintenance and inspection needs in large industrial plants, choosing inspection operations based on various criteria, designing modifications in existing MMs to meet the identified requirements, developing and adjusting inspection technologies to be integrated into autonomous MMs, justifying in simulation, integrating robotic platforms and non-destructible materials, and integrating these elements into new and existing robots, verifying using a mock-up, and at the end, in real-world case studies. One of these case studies that was carried out at VALLE energy plants is shown in Figure 2.21. The tool containing the sensor is positioned perpendicular to the mirror in the actual operation, and the approach maneuver is carried out until

2.2. STATE OF THE ART IN AUTOMATION AND INDUSTRIAL ROBOTICS

the sensor hits the mirror. The tool holder's three ultrasonic sensors produce signals that are utilized to regulate the trajectory.



FIGURE 2.21 – Mirror reflectivity measurement at VALLLE energy plant by MAINBOT adopted from[64]

IAAM (Institute for Applied Automation and Mechatronics) - provides a few multidisciplinary projects that combine applied research with real-world application. FiberRadar is one of them in which the MM OMNIVIL has been used. A quality control technique is being developed for the production of high-strength fiber composite materials as part of the FiberRadar research project. Prior to casting, the approach displays the fiber structure in three dimensions to show any abnormalities and improve the stacking and flow of the fibers. To enable more precise quality control than is currently achievable, the IAAM is in charge of creating a transportable measurement system for large-scale components used in the production of wind turbines [66]. With the automobile sector as a potential user, the STAMINA (Sustainable and reliable robotics for part handling in manufacturing) project entails creating a fleet of robots that can carry out bin-picking and kitting activities in human-populated settings. The manufacturing line speed, which for example is one vehicle per minute for their use case at PSA, determines the robots' operating pace [67].

In industries like aerospace and shipbuilding, where huge components are manufactured in fixed production units, the VALERI (Validation of Advanced, Collaborative Robotics for Industrial Applications) project explores the necessity for MMs. An MM operating alongside human co-workers is recommended in such circumstances as specialized stationary robotic devices are not cost-effective. The systematic design of such an MM is described by K. Zhou et al, [68], together with hardware and software considerations for load balancing, efficiency, and safety. The two responsibilities of applying sealant and visual inspection in aerospace production are also covered in their article (Figure 2.22) as well as a graphical user interface that can be customized is provided for evaluating and validating

2.2. STATE OF THE ART IN AUTOMATION AND INDUSTRIAL ROBOTICS

the system design. Figure 2.22 shows the robot they used for the sealing operation consisting of a KUKA lightweight arm mounted on a KUKA omniRob mobile platform. VALERI is a special design of an MM developed for the project of the same name. VALERI consists of a KUKA omniRob mobile platform (with four omnidirectional wheels), and a 7 DoF lightweight robot (KUKA LBR4) on a vertical lift that provides two extra DoF with a linear axis and a rotational capability, which has a total of 12 DOFs (Figure 2.23). Three use case applications – sealant, inspection of the applied sealant, and the inspection of braided carbon fiber parts – had been selected for VALERI to operate in the aerospace production systems. This project covers the safety issues, sensor technologies specifically designed for safety and interaction with MMs [69], sensor fusion techniques [70], as well as workspace monitoring [71], human-robot collaboration aspects such as hand-guidance of redundant MMs [72], and control strategies and effective redundancy solutions [73] to perform multiple operations at once to take advantage of the whole robot system’s capabilities [74].



FIGURE 2.22 – The use of MM in aerospace production system of Airbus Defence Space adopted from [68]



FIGURE 2.23 – KUKA VALERI mobile manipulator adopted from [73]

TABLE 2.2 – Summary of MM Applications in Various Industries

Citation	Application	Industry	Project	MM	Year
[45]	Multiple part feeding	Grundfos		Little Helper	2011
[49]	Assembly, machine tending, quality control	Grundfos	TAPAS	LH3 and omniRob	2014
[50]	Assembly, quality control, logistics	Grundfos	TAPAS	Two LHs	2015
[51]	Multiple part feeding	CR 1-2-3 impeller line		LH	2017
[52]	Part feeding	Festo cyber-physical factory		LH6	2017
[54]	Placement of common object with human	Aerospace	SHERLOCK		2014
[55]	High payload assembly	CALPAK	SHERLOCK		2023
[56]	Assembly of hydraulic pumps and the assistance of manual gas metal arc welding	Hydraulic pumps	MORPHA	rob@work	2002
[57]	Logistics and assembly	Automotive, Aerospace	SAPHARI	omniRob	2012
[60]	Kitting	TAS-F	ColRobot	KMR IIWA	2020
[58]	Fastener tightening and automatic refill	Automotive industries	ColRobot	ColRobot prototype	2020

Continued on next page

Table 2.2 – continued from previous page

Citation	Application	Industry	Project	MM	Year
[62]	Smart logistic, assembly of vehicle dashboards, assembly of aircraft wing parts, and handling and packaging of shaver handles	PSA, AIR-BUS, BIC	VERSATILE	BAZAR	2019
[63]	Fetch-and-carry	Clean room	ISABEL	ISABEL	2023
[66]	Quality control	Production of wind turbines	FiberRadar	OMNIVIL	2021
[67]	Bin-picking, kitting	PSA	STAMINA		2014
[68]	Applying sealant and visual inspection	Aerospace, Shipbuilding	VALERI	VALERI	2014
[65]	Industrial maintenance	VALLLE energy plant	MAINBOT	MAINBOT	2014,2023

2.2.2.2 Mobile manipulators in Industry 4.0

Industry 4.0 has revolutionized production and industrial approaches focused on the application of advanced technologies such as AI, machine learning, and the IoT, which led to a new era of automation and digitization. Robotics is no exception to this, and its development process has changed based on the needs of Industry 4.0. Thus, robots are no longer just tools for performing dangerous or repetitive tasks but are now being used in new and innovative ways to improve efficiency and productivity. Safety navigation, part separation, and inspection expertise, adherence to safety standards, dependability, sustainability, and the capacity to be use-case independent and adjustable with little programming are the major needs for the MMs. The MMs must also be manageable by a resource management system for the business, and shop floor employees must be able to utilize and modify them instantly to new handling jobs.

In the following, a few ways in which Industry 4.0 has changed robots are categorized.

Increased connectivity and interoperability

One of the principles of Industry 4.0 is to connect system components in a decentralized architecture. Thanks to developments in IoT and M2M communication technologies, the connectivity of MMs in industrial environments has been enhanced. MMs can now conduct more complicated tasks and work together more effectively with other devices because of this improved connection. Industry 4.0 has a serious role in the standardization of communication protocols such as OPC UA. MMs may more easily be integrated into current production processes thanks to these protocols, which support interoperability between various equipment and systems.

Data collection and analysis

Collecting data and its analysis to achieve useful information in real-time is one of the other important aspects highly recommended by Industry 4.0. Thus, MMs are equipped with a wide range of sensors and data collection tools to collect and transfer data in various required metrics to the managerial data storage. Advanced analytics and machine learning algorithms can be used to optimize the performance of MM itself and also to discover the surrounding environment. Gathering and analyzing large amounts of data in real-time assists MMs to adapt to changing and dynamic conditions, and optimize their performance to improve efficiency and productivity. Utilizing AI methodologies to discover patterns and trends helped to predict potential issues before occurring. Predictive maintenance is one of the advantages of this analysis. At high levels, complete autonomy is expected based on the wide range of data transfers from all of the system devices. In such systems, self-optimization and decision-making tools are strengthened.

Improved flexibility

Flexibility refers to the ability of the system to adapt quickly to changes in conditions, demands, and requirements. Industry 4.0 is characterized by the use of advanced technologies to create more flexible and adaptable manufacturing systems. Industry 4.0 expects MMs to operate flexibly, also, to flexibly integrate into the production system, so that any changes in the whole system can be perceived by the MM and it can react to it dynamically. To address this issue, different research has been conducted.

Flexible navigation, path planning, Localization, and mapping

The distinction between preprogrammed and real-time programming of the common planning

algorithms depends on whether the environment map is known or unknown. Many studies based on structured environments have been conducted in the past, which suggests that CMIM might accomplish localization and navigation by preprogramming. Industry 4.0's trend has evolved into a more adaptable mechanism, allowing the system to update the map concurrently and therefore improve efficiency. SLAM, or simultaneous localization and mapping, is a popular method for structuring the world at the same time.

Motion planning is difficult due to MMs' distinctive features. Planning algorithms should take into account the behavior of the system to provide optimum plans quickly. Preparing separately for the mobile base and manipulator might result in inferior plans. It has not been thoroughly investigated how to coordinate movements between the mobile base and manipulator during planning, but applying machine learning approaches to determine the MM's capabilities can assist. System dynamics aren't heavily used in the planning algorithms used today; instead, they concentrate on designing geometric paths [75]. The innovative MM (MRP) is developed for flexible manufacturing systems considering design, navigation, and docking aspects by [76] within the THOMAS project.

Path planning refers to the task of identifying a safe and efficient route from the present position of a vehicle to a target destination while avoiding any obstacles [77]. It is a vital problem especially according to the control engineers [78]. The mobile robot path planning can be split into two categories global and local path planning. Global path planning refers to the path generation in a known environment while local path planning addresses an unknown environment with unexpected moving obstacles that can be observed by the robot's sensors [79]. A. Montazeri et al. [78] suggested four important criteria for a path planning algorithm as follows : optimization, completeness, accuracy, and execution time. G. Spyros [80] also classified the path planning methods into three categories of reactive control, representational world modeling, and their combination. F. Wayne et al. [81] formulated an optimization problem for MMs by separating the degrees of freedom (DOF) for mobility and for the manipulator. They developed a simulated annealing method for solving their model. M. Zhao et al. [82] on the other hand applied a genetic algorithm. Path planning for a welding MM is considered in the research of W. S. Yoo et al, [83]. For the purpose of controlling an MM with two arms in path tracking and point-to-point motion, M. H. Korayem et al, [84] studied the use of a path planning algorithm in the feedback linearization approach. F. Burget et al, [85] offered a BI2RRT (Bidirectional Informed rapidly exploring random tree) planning methodology for creating asymptotically optimum

pathways for MMs under task restrictions. A* algorithm has been used for the MM's end effector path planning problem by G. Silva et al, [86]. For a class of hyper-redundant mobile soft manipulators that approach and handle objects while simultaneously avoiding obstacles based on potential field of velocity, S. Mbakop et al, [87] proposed a curvature control technique. Their method is built on the sliding mode concept, which converges in a finite amount of time.

A flexible stochastic approach has been provided by M. Haddad et al, [88] for point-to-point trajectory planning of nonholonomic wheeled MMs moving in a structured workspace while considering geometry, kinematics, and dynamics constraints. In order to assure base motion coordination along the predetermined path while generating the best motion trajectory for the end-effector, extra kinematic constraints and generalized coordinates are chosen in the approach of M. Habibnejad Korayem et al, [89]. The approach for creating a suboptimal trajectory for an MM under mechanical and control restrictions is presented in the study of G. Pajak and I. Pajak [90]. The path of the end-effector is described as a curve that may be parameterized by any scaling parameter. Control constraints, collision avoidance requirements, and limitations related to the existence of mechanical restrictions for a certain manipulator configuration are taken into consideration. The research of M. Giftthaler et al, [91] is concerned with the challenge of kinematic trajectory planning for MMs under holonomic operational-space tracking, and non-holonomic constraints. They utilized a constrained SLQ for their work and established experiments for a 26 DoF mobile platform. I. Akli [92] introduced a manipulability percentage index (MPI) in their research to avoid singularity and to place the mobile robot in areas that guarantee regular access.

Flexible scheduling

The use of a decision-making framework for integrated task scheduling and resource mobility planning in hybrid production systems is discussed in [93]. The modular Robot Operating System (ROS) framework, an open-source platform that enables the interfacing of multiple robot kinds and robot brands, serves as the foundation for the proposed design, making it open. As a result, it is simple to include new sorts of resources in the decision-making process. The framework supports the scheduling of operations for the assembly of various components by interpreting various assembly sequences using a unified digital world modeling methodology. Using the mobile robot behavior as an assessment measure, such as execution time and travel distance, the system is able to optimize the task plans that are created. The implemented system also offers a number of improvements, including

the ability to reconfigure the production system by moving mobile resource platforms to various workstations according to needs, the ability to generate the most practical and efficient robot motion plans, and the ability to enable online access to real-time shopfloor status using the identified obstacles as input. The suggested approach offers a viable response to the challenges in hybrid production systems and is suited to small to medium-sized production systems. Future research should, however, concentrate on improving and fine-tuning the suggested system in order to make it usable for a wider-scale application. The system should be integrated with a factory's legacy system in this approach. This will make the proposed decision-making framework more practical and relevant to a larger range of production systems by enabling seamless communication between the existing systems and it.

A novel scheduling issue involving a single MM performing feeding duties in a production cell is investigated in [48]. Mission planners must choose the best feeding sequence to reduce the overall traveling time of the MM while taking into consideration the unique characteristics of the robot and a variety of technological limitations in order to complete all tasks within the permitted limit of battery capacity. With the purpose of locating the best solution, a novel mix-integer linear programming model is created. To demonstrate the effectiveness of the suggested methodology, a specific real-world example of an impeller production line composed of four feeders is detailed. The outcome was very appropriately used in actual feeding operations, and it showed that all feeders had no trouble feeding components to the production line. By taking into account a high number of feeders and/or a lengthy planning horizon, the complexity of the issue classified as being NP-hard will rise. As a result, a meta-heuristic approach will be used to resolve the large-scale mobile robot scheduling problem. Also, a rescheduling system based on collected schedules and input from the shop floor will be created to address real-time disruptions.

Flexible control and coordination

Control systems include a number of components, such as control type, method, and controller, with the goal of improving the performance of the entire system in terms of tracking, disturbance rejection, resilience, and other factors. In general, there are three different ways to control CMIM : manually, semi-autonomously, and totally autonomously. Manual control, a secure but complex method of system control, has received a lot of attention in studies to this point. Both manual and autonomous control are benefits of the semi-autonomous control technique. The greatest method to create a completely intelligent industry is through autonomous control, which enables the system to learn and respond

2.2. STATE OF THE ART IN AUTOMATION AND INDUSTRIAL ROBOTICS

autonomously. Table 2.3 shows the differences between the three control types presented by [94].

TABLE 2.3 – Comparison of Different MM Control Strategies

System Control	Description	Benefits	Drawbacks
Manual	Fully controlled by humans	Timely error handling	Can be complicated
Semi-automatic	Partial human control	More robust	May be inefficient
Automatic	No human intervention	Efficient	Decision costs can be high

According to [95], it can be dangerous to utilize a completely autonomous MM for some industrial tasks such as material handling and machine tending since an incorrect representation of the working environment could lead to costly machinery being harmed. In contrast, using a completely teleoperated MM could take a lot of operator time. For this reason, they designed a semi-autonomous MM to perform machine tending duties under human supervision safely and effectively. Using the high-level task description, the robot may create motion plans and provide simulation results to a human for approval. The human operator has the option of giving the robot permission to carry out the automatically created plan or giving the planner more information to improve the plan. The person can choose to use teleoperation to securely complete the activity if the workspace model contains areas with a high level of uncertainty.

Although MMs can be partially pre-programmed and semi-autonomous, the variety of industrial environments may make it difficult for the system to be used in various situations. Also, the system's intelligence at this point is insufficiently advanced to handle independently some issues or unclear data. The future of MMs would be fully autonomous systems, allowing the system to carry out entire tasks on its own. This may increase the maturity of systems in terms of the fourth industrial revolution, but the intelligent system has to be reliable and safe in addition to being able to spot mistakes in both organized and unstructured situations.

In order to create flexible manufacturing systems, research within the project RedRobCo suggested employing a force torque sensor close to the end effector to implement code-free programming and natural hand guiding. Using haptic feedback, the control structure manages kinematic redundant arm configurations and steers clear of them. The article contains laboratory experiments on the MM chimera

to show the functionality of the controller design, along with a thorough study of potential singularities [96]. The interest in contactless MM control in delicate settings like clean rooms is discussed within the project CapSize. [97] described a capacitive sensing-based contactless control system that is resistant to mechanical impact, dirt, occlusions, and poor lighting. The sensor can be integrated into a workspace or mounted directly on a robot arm. To recognize gestures, a straightforward model-based method is utilized, making it simple to adapt to diverse geometric constraints. The article showed the system's capabilities by regulating an MM's end-effector velocity in a 3D task space and giving the operator feedback. Also, in the CollRob project, [98] discussed how to program robot systems entirely without writing a single line of code, and it presents a practical method for programming delicate MMs with hand guiding that makes use of a force torque sensor that is mounted near to the end effector. Results of laboratory tests are reported, and a detailed explanation of the suggested control method is provided.

Sensing and perception

One of the first prerequisites of MMs to work in smart manufacturing systems is the ability to perceive their surroundings and accordingly make decisions. A wide variety of sensors and capturers are developed and under development. The use of new technologies to improve the perception of MMs is addressed in many researches. The first stage for MMs to perceive their surroundings is to determine where they are in relation to their surrounding world. The difficulty in using the calibration technique on MMs is brought on by the variation in error between the mobile platform and stationary manipulators. The eye-in-hand calibration approach was used in the publications [99] using an MM to identify the actual coordinates of objects in the world coordinate.

The advancement of hardware (GPUs) and deep learning techniques over the past ten years have greatly benefited the challenging discipline of computer vision known as object detection. With algorithms like face detectors functioning in many common applications, object detection is increasingly becoming the state-of-the-art AI technique in our modern world. Broadly speaking, object detection is a technique for locating an object of interest in a photo and determining if it is present. G. Andrianakos et al, [100] addressed employing object detection to monitor assembly-line personnel using machine learning methods. When an assembly task is finished, the system should signal that information. There are two techniques to determine this. As pieces need to be placed together in order to be assembled, the first one is comparing the locations of the assembly parts (PD). Detecting which object is grasped by a human is the other method (HPD). As the phrase says, it may be difficult to detect for micro parts,

while being effective for bigger parts. In order to ensure that the proper assembly work is being carried out and to avoid mistakes, the article suggested employing a two-level check technique utilizing the PD and HPD methodologies. The research also emphasized how critical it is to establish a threshold for grabbing likelihood in order to prevent false alarms and the potential advantages of adopting error detection techniques in industry to speed up production, cut waste, and enhance product quality. The BACCHUS project (MoBile Robotic PLAtforms for ACtive InspeCtion and Harvesting in AgricUltural AreaS) investigates the use of dual-arm MMs in agricultural areas for active inspection and selective harvesting. Within this project, for effective grasping, I. Sarantopoulos et al, [101], [102] proposed approaches to detect the desired object in a cluttered environment and to make enough space around it for easier picking by pushing the surrounding objects. Instant segmentation has been investigated by I. Kleitsiotis et al, [103].

Human-robot interaction and safety

Collaborative robots (cobots) are one significant way that Industry 4.0 has impacted HRI for MMs. Cobots are made to work alongside people, as opposed to traditional robots, which are made to operate without the assistance of humans. Because employees can easily direct the cobot's motions or even physically engage with it when necessary, HRI has become more natural and intuitive. With the increased interaction between humans and robots, safety has become an even more critical concern. Industry 4.0 has also brought about advancements in safety technology for MMs. For example, some MMs are now equipped with sensors and cameras that can detect and avoid obstacles, as well as software that can predict potential collisions and stop the robot before it occurs.

Depending on the use of the robotic arm, certain criteria must be applied to MMs : 1) Robot arm rests when the mobile platform is moving : The robot arm may be viewed as a load, and the risk assessment for the whole danger must be determined using an analogy to normal mobile robot standards. The precise description of a secure place in which the robot will be carried is essential. Robotic standards must be taken into account for the interfaces on which the report completes its duty. 2) Robot arm performs assembly or processing operations while in motion : The required risk assessment must be conducted for the robot arm using all robotic standards [104]. Following that, the entire application, including the moving platform, robot arm, and surrounding area, must be assessed in accordance with EN ISO 10218 part 2, which addresses the integration of industrial robot applications [105].

A variety of AI-based tools are being developed by researchers so that robots can interact with and comprehend humans more effectively. N. Dimitropoulos et al, [54] categorized these tools into five main classes. 1. The "process perception module" is one of these tools, which makes use of computer vision to recognize the tasks being carried out by human workers. This module can assist the robot in comprehending what the user is doing and modifying its behavior as necessary. 2. The "workstation monitoring module" is another instrument that employs sensors to find impediments and human employees in the workspace. The robot's motion planners then receive this data and utilize it to create a safe path and prevent collisions. 3. In order to provide the robot with a more thorough grasp of its surroundings, the "shop floor digital representation module" builds a digital version of the workspace. 4. The "task and action planner" aids in workload distribution between human and automated workers by determining the most effective course of action for each activity. 5. Finally, "autonomous learning strategies" allow the robot to modify its behavior in response to input from human workers, making sure it is satisfying their wants and preferences. By combining their efforts, these tools can make it easier for humans and robots to operate together safely and effectively, increasing productivity and lowering the risk of accidents. Machine learning techniques are being used in the ColRobot project to validate workplace monitoring and human identification for flexible safety [106].

Discovering the inefficiencies in hybrid human-robot collaborative workstations and improving them with AI-based solutions and smart mechatronics is one of the remarkable issues addressed by the SHERLOCK project [54]. In this project, several articles focus on HRC [107],[108],[109], [110] such as the work on dual-arm co-manipulation architecture with enhanced communication [111], psychological and physiological acceptance of robots by humans [112], and the use of AI and wearable devices for collaborative assembly [113],[114][115]. The project also includes using human activity recognition sensors to improve the performance of collaborative MMs [116], [117] using machine learning [100], and developing a task and action planning approach in human-robot collaborative cells using AI [118]. HRC for picking and moving common objects with humans is discussed in [119]. [120] Reviewed the use of Digital Twin (DT) for HRC enhancement.

Safety and HRI are the primary goals of the SAPHARI (Safe and Autonomous Physical Human-Aware Robot Interaction) project. A collision-free robot motion is planned, and the robot constantly responds to unexpected dangerous situations by adapting its planned motion, slowing down, or stopping. This is accomplished by continuously monitoring the robot's environment using multiple depth

2.2. STATE OF THE ART IN AUTOMATION AND INDUSTRIAL ROBOTICS

sensors to gather information about obstacles and predict their motions. These techniques have been put into practice on omniRob that can pick up, position, and deliver things to people in a shared workspace while enhancing the route and collision avoidance behavior for both the robot platform and manipulator [121]. The project concentrated on two industrial use cases, developed by the industrial partners AIRBUS (Figure 2.24-left) and KUKA (Figure 2.24-right), that clearly include intentional physical interaction between a human and a robot coworker. Under the direction of DLR, a professional service scenario for hospitals was designed, including close daily interactions between medical professionals and an aiding robot [122].



FIGURE 2.24 – SAPHARI demonstrations : left- Airbus use case, right- Kuka use case adopted from [122]

SOPHIA (Socio-physical Interaction Skills for Cooperative Human-Robot Systems in Agile Production) primarily aimed to address the problem of HRC. Lamon et al. [123] suggested an interface for MMs that enables them to communicate safely while adhering to human commands utilizing haptic admittance and visual tracking modules. Safety is also addressed in [124], which presented MOCA-S, an MM with a capacitive tactile cover for secure in-person HRI. The THOMAS project focuses on using mobile dual-arm robots that can sense their surroundings and collaborate with other production resources, including human operators, to build a reconfigurable shop floor. The project’s goals include enabling the movement of resources and goods, enabling perception of the job and surroundings, dynamic workload balancing, enabling quick programming and task execution, and ensuring secure HRC. The research areas within this project can be categorized into five main areas of focus. Firstly, they introduced an innovative MM (Figure 2.25) [76] and their application in assembly systems [125], and enhancing the HRI and HRC by introducing wearable devices such as smartwatches [126] and by employing AR-based software [127], [128]. Developing a digital world model [129] and DTs for designing

and optimizing the design has been investigated in [130],[131].



FIGURE 2.25 – MM designed in THOMAS project adopted from [132]

OMNIVIL has a self-designed mobile platform with holonomic kinematics for agility in dynamic and unstructured environments. It has three main advancements, one of which is a redundant workspace monitoring system that employs thermal and RGB cameras, LIDAR sensors, and deep convolutional neural networks to identify and categorize barriers and human employees. The scalable, adaptable zone-based navigation paradigm uses case-based behavior to enhance HRI [133].

Virtualization

Industry 4.0 enables virtualization for MMs by utilizing various technologies, such as AR and Virtual Reality (VR). In order to remotely operate MMs and see the manipulator's activities in real-time, these technologies may be utilized to construct virtual representations of the environment and the items in it. DTs also enable systems to optimize product design, improve production processes, and reduce maintenance costs. Industry 4.0 expects MMs to provide enhanced visualization capabilities, enabling operators to have a better understanding of the task at hand and allowing for more precise manipulation of objects. This includes the ability to visualize the manipulator's workspace, detect and track objects, and display augmented information on the environment. Additionally, MMs are expected to be integrated with other Industry 4.0 technologies, such as the Industrial Internet of Things (IIoT), to enable data collection and analysis to optimize performance and productivity. Overall, Industry 4.0 expects MMs to provide a more efficient and effective means of completing tasks, with the help of

advanced visualization technologies.

In order to combine and update the virtual environment with real-time data from several modules, including damper, barriers, and person detection, [130] implemented a DT infrastructure for a flexible assembly line. In order to evaluate HRI through gesture recognition, a scenario was put up in the GAZEBO physics simulation engine and included CAD files, virtual controllers, laser scanner data, simulated stereo camera data, and actual Kinect data. In order to enable the dynamic behavior of HRC reconfigurable systems, [131] presented a DT-based system to complete the loop between the design and operation phases. To create the system's layout and work plans, the DT is combined with an AI decision-making logic. The physical assets and unified interfaces of the DT smart models are dynamically updated during runtime, creating the real-time planning scenario that is utilized when re-design is required. The suggested method aims to get over current restrictions on execution sequencing and online reconfiguration of hybrid industrial systems. Their DT model provides the data required to optimize the system's structure by allocating duties to MMs and human operators at various workstations. A group of perception modules are deployed during execution to keep an eye on the execution, the surroundings, and people's behavior using a variety of sensors. These sensors record pictures in both 2D and 3D. These data are synthesized using the applicable DT data structures and used to populate the real-time planning scenario as an activity map.

To benefit from the advantages of DT, it is necessary to address the issues with CPS and IoT as well as improvements in simulation environments with physics engines. To create more precise DTs, improved modeling of complicated jobs is also required. Better data flow between the DT's many modules is also crucial. Key enablers in this respect include further advancements in semiconductor processing and communication technology [120]. Cloud manufacturing - In line with Industry 4.0, a contemporary production approach known as "cloud manufacturing" (CMfg) turns traditional manufacturing resources into services by utilizing cloud computing, the IoT, and virtualization, and then makes them accessible through the Internet. When necessary, the employment of the various manufacturing services may be cost-optimized thanks to an intelligent, cloud-based platform that controls them. The idea of CMfg encompasses every stage of a product's life cycle, from creation and design through manufacture and testing to maintenance while in use. Manufacturing as a Service (MaaS) is the term for the cloud-based provision of production resources such as hardware and software programs, as well as knowledge-based competencies. The best services are chosen, capacities are established, and

orders are planned and regulated using CAD data and databases of knowledge-based machines and materials. In this approach, a large number of clients may best access a wide range of providers—even those that are locally distributed—plan their own control and management layer (cloud layer), and manage production capacity, manufacturing processes, operations, and transactions. The ability of MMs to interact and communicate has developed to the point that they could potentially be included in the overall production network. The aforementioned benefits enable MMs to operate efficiently and effectively in environments for advanced manufacturing, particularly CMfg, which naturally followed the introduction and success of cloud computing. In CMfg, manufacturing resources (MMs) and manufacturing capability (task flexibility and robotic mobility) are offered for requests in distinct sites within factories through centralized management. Moreover, these benefits of MMs help CMfg manufacturing lines, which are intended to be transitory in nature, produce small batches while also allowing for longer production runs. As a result, the MM technology has enormous promise for the manufacturing sector as a whole and CMfg in particular [51].

Cyber Security

Cybersecurity is a critical aspect of Industry 4.0, and MMs must comply with industrial cybersecurity standards and regulations to ensure the security and integrity of production processes. According to Industry 4.0, MMs should have a robust cybersecurity posture to resist against possible threats including data leaks, hacker attacks, and other malicious activities. To transfer sensitive data to other equipment and systems on the shop floor, such as project specifications, production plans, and other confidential information, and in order to avoid unwanted access to the system, MMs must have secure communication channels.

The security requirements of MMs can be categorized into physical-based and network-based attacks [134]. Network interfaces and unsecured USB ports need to be avoided since they can be used to install malware or steal data. In order to request new jobs and connect with other machines and people, the robot has to be able to engage with external systems like MES. To guard against unapproved access or data breaches, this communication should be secure. The robot should have safeguards in place to thwart attempts at manipulation by users and operators during secure contact. This covers both the robot's secure initial commissioning and the secure reprogramming by shop floor staff. An architecture for MM security has been developed and integrated into the CHIMERA in [134]. With only designated channels connecting the subsystems, the security architecture for the CHIMERA robot is

2.3. CONCLUSION

built on subsystem isolation. Also, they divided the software stack among many physical equipment, making it more difficult for attackers to breach other subsystems. They deployed AppArmor2 on the devices to provide precise permissions for users and processes. An obligatory access control system called AppArmor enables the isolation of certain apps in terms of access to other resources (like files and devices). They employed it to restrict the alteration of vital system components while yet granting system integrators limited access to the internals of the CHIMERA.

2.3 Conclusion

Through an extensive review of literature from academic databases such as Google Scholar, Science Direct, and Scopus, significant research activity surrounding Mobile Manipulators (MMs) and their industrial applications was identified. Figure 2.26 illustrates the intricate interconnections between various fields of study and their relationship with MMs within the industrial landscape. While there is a notable emphasis on control and navigation, as depicted in Figure 2.27, it is evident that research is predominantly focused on technical aspects. However, there is a noticeable gap in the literature regarding guidelines or frameworks for seamlessly integrating MMs into industrial settings, highlighting the need for strategies that facilitate their efficient utilization.

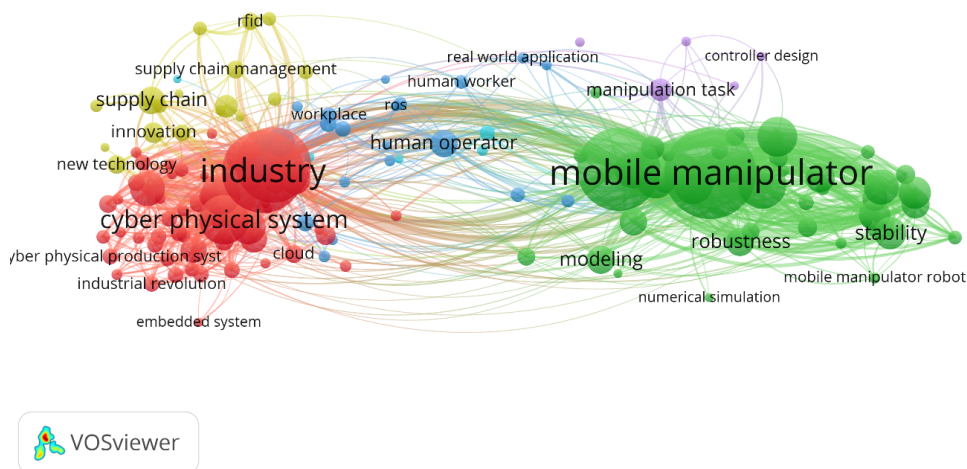


FIGURE 2.26 – co-occurrence map based on text data

2.3. CONCLUSION

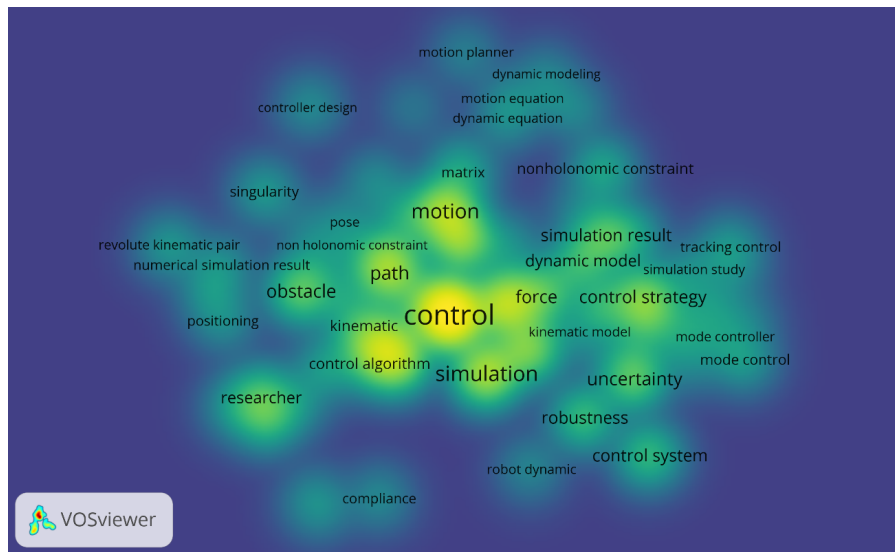


FIGURE 2.27 – Density visualization of terms related to MMs

2.3. CONCLUSION

Chapitre 3

Development of the framework

content

3.1	Phase I : Objectives and Applications	79
3.1.1	Defining integration goals	80
3.1.2	Defining applications	84
3.2	Phase II : Infrastructure readiness	91
3.3	Phase II-I : Pre-study	91
3.3.1	General prerequisites	92
3.3.2	Prerequisites based on the principles of Industry 4.0	97
3.4	Phase II-II : Infrastructure modification and MM selection	102
3.5	Phase III : Integration	104
3.5.1	Integration types	104
3.5.2	Integration Types and Industry 4.0 Principles : A Synergistic Framework for Modern Manufacturing	108
3.6	Conclusion	113

Integrating new technologies, such as MMs, into existing production systems presents an opportunity to embrace the principles of Industry 4.0 and unlock new levels of productivity, efficiency, and flexibility. To guide this integration process, a comprehensive framework is required, encompassing key considerations and principles of Industry 4.0. The proposed integration framework is a systematic approach spanning three primary phases. Initially, "Objectives and Applications" are outlined. In this foundational phase, the specific roles and tasks anticipated for the MMs are clearly defined, ensuring that their integration is purposefully aligned with broader production ambitions and addresses the unique challenges and potentialities of each system. Transitioning from this foundational layer, the "Infrastructure Readiness" phase begins. A comprehensive pre-study is employed as a pivotal diagnostic tool, offering an in-depth examination of the existing setup. Strengths are recognized, and potential areas of enhancement are identified through this thorough evaluation. Informed by these insights, necessary infrastructural modifications are then proposed, setting a conducive groundwork for MM operations. Concurrently, the selection of the appropriate MM is carried out, ensuring compatibility with both the set objectives and the adapted infrastructural framework.

Finally, the integration phase focuses on a multifaceted integration process. Physical compatibility and task proficiency of the robots within the production environment are ensured through "Physical Integration." Following this, "Communicational Integration" is prioritized, with data flow and interoperability mechanisms being established to promote smooth interactions between the MM and existing systems. The functionalities of the robot are then synchronized with ongoing processes and human interfaces in the "Functional and Operational Integration" segment. Lastly, through "Digital Integration," the MM is adeptly anchored within the digital architecture of Industry 4.0, leveraging advanced tools such as digital twins and real-time analytics. Figure 3.1 provides an overview of the framework's distinct phases. A comprehensive exploration of each phase follows in the subsequent sections.

3.1. PHASE I : OBJECTIVES AND APPLICATIONS

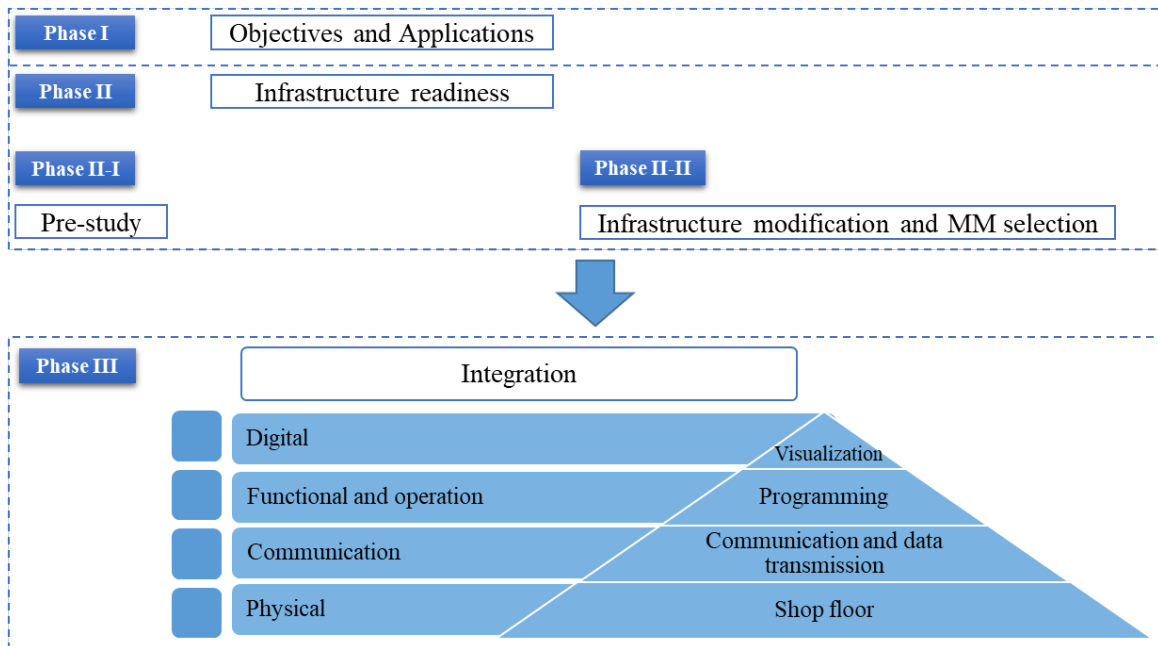


FIGURE 3.1 – General phases of the proposed framework of integrating MMs into existing production systems

3.1 Phase I : Objectives and Applications

In this section, a framework is created and established to integrate MMs into production systems, with a specific emphasis on Industry 4.0. Under this framework, MMs are considered as CPSs within the overall system. The initial stage involves acknowledging the importance of incorporating an MM and understanding the specific requirements of the production system. To determine the necessity and applications of MMs in any given production system, the following two key questions have been addressed :

- What is the rationale behind utilizing an MM in the existing system? (Defining integration goals)
- In which scenarios and for which specialized tasks, the deployment of an MM is considered favorable? (Defining applications)

Figure 3.2 represents the categorization of objectives and applications that are explained in more detail in the following.

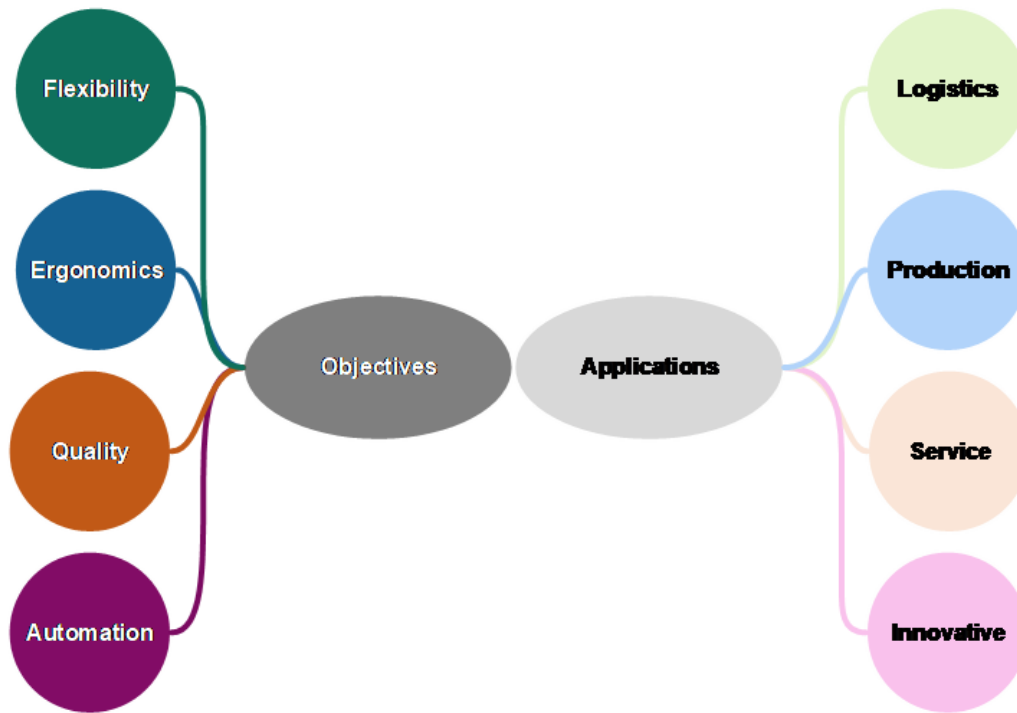


FIGURE 3.2 – Key categories of mobile manipulators’ objectives and applications (Phase I of the framework)

3.1.1 Defining integration goals

To address the initial question regarding the utilization of MMs in a production system, the reasons for choosing their presence are categorized based on the features and advantages they offer. These reasons can be divided into four distinct categories. First, MMs are employed to enhance and expand the system’s flexibility. Second, they contribute to the automation of the system, enabling greater efficiency. Third, MMs are utilized to improve ergonomics within the production process. Finally, their integration serves to enhance the overall quality of the products being manufactured.

3.1.1.1 Flexibility

Industrial systems exhibit different types of flexibility, encompassing machine flexibility, routing flexibility, volume flexibility, and material handling flexibility [135]. MMs contribute to enhancing each of these categories to varying degrees.

Enhancing material handling flexibility is a fundamental objective in employing MMs. By com-

3.1. PHASE I : OBJECTIVES AND APPLICATIONS

binning mobility and manipulation capabilities, MMs can efficiently transport and handle materials within the production environment. They can autonomously navigate through the facility, pick up, and transport materials, facilitating tasks such as loading and unloading, sorting, and assembly. MMs contribute to streamlining logistics operations, optimizing material flow, and improving overall efficiency in material handling processes.

Machine flexibility is the capacity of a machine to carry out a variety of tasks, allowing a wider range of operations to be carried out with a single unit [136]. Since MMs are inherently adaptable, they are capable of multiple tasks with just one configuration. MMs may also quickly adapt to various applications by simply switching out their end effectors or tools. By eliminating the requirement for specialized machinery for each distinct operation, this capacity improves resource usage and boosts production.

Routing flexibility is another area where MMs excel. The ability to adjust production plans and sequences is crucial for optimizing workflow and material flow [137]. MMs, with their mobility, can move between different production stations, effortlessly performing tasks wherever they are needed. This flexibility allows manufacturers to optimize material flow, balance workloads, and adapt to changes in production requirements with ease. It is like having a worker who can seamlessly switch between workstations, ensuring smooth operations throughout the production process.

Lastly, **volume flexibility** is essential for efficiently managing production volumes. Fluctuating demands require a system that can handle varying workloads without compromising efficiency [138]. MMs provide a scalable solution, allowing businesses to deploy them as needed in different workstations or production lines. They can dynamically adjust their workload distribution and optimize movements to efficiently handle high or low production volumes. It is like having a reliable worker who can seamlessly adapt to changing production demands, ensuring optimal productivity.

3.1.1.2 Ergonomics

In the realm of ergonomics, there are five well-known categories known as the "Five D's" that encompass challenging work conditions : dirty, difficult, dull, dangerous, and dumb works [139]. These terms describe tasks that are physically demanding, mentally monotonous, potentially hazardous, or simply inefficient. Given the principles of ergonomics, the demand for MMs becomes apparent as they offer viable alternatives to, or support for, human workers in various scenarios.

3.1. PHASE I : OBJECTIVES AND APPLICATIONS

Dirty work refers to tasks that involve handling messy or unclean materials, such as waste disposal or cleaning tasks. By employing MMs, these dirty tasks can be efficiently carried out without exposing humans to potentially harmful substances. MMs can navigate through challenging environments, handle waste materials, or clean surfaces, thereby alleviating the burden on human workers and promoting a healthier and safer work environment.

Difficult work refers to physically demanding tasks that may require significant strength or endurance. MMs equipped with appropriate lifting and carrying capabilities can assist in these challenging activities. They can transport heavy objects, manipulate bulky items, or perform repetitive lifting tasks, reducing the physical strain on human workers and preventing potential injuries.

Dull work encompasses repetitive and monotonous tasks that can lead to fatigue, boredom, and decreased productivity. MMs can be employed to automate such mundane activities, allowing human workers to focus on more engaging and intellectually stimulating tasks. By delegating dull work to MMs, organizations can improve worker satisfaction, increase efficiency, and enhance overall job performance.

Dangerous work involves tasks that carry inherent risks to human safety, such as working in hazardous environments or handling dangerous substances. MMs equipped with sensors and advanced safety features can perform these tasks with precision and accuracy, minimizing the exposure of humans to potential harm. By deploying MMs in dangerous work scenarios, organizations can significantly reduce the risk of accidents and ensure the well-being of their workforce.

Dumb work refers to activities that are repetitive, rule-based, and do not require high-level decision-making. MMs can take on these tasks by following predefined instructions and executing them accurately. This frees up human workers to focus on more complex and cognitive-intensive aspects of their job, where their expertise and problem-solving abilities are better utilized.

3.1.1.3 Quality

The pursuit of higher product quality serves as another driving force behind the inclination to utilize MMs. Employing MMs in tasks related to quality control and inspection, as well as for high-precision work, proves instrumental in achieving this objective. One compelling reason to integrate MMs into production systems is their effectiveness in quality control and inspection processes. MMs

3.1. PHASE I : OBJECTIVES AND APPLICATIONS

equipped with advanced sensors, cameras, and measurement tools can meticulously examine and assess product components or finished goods. They can perform inspections with exceptional precision and consistency, ensuring that products meet stringent quality standards. By leveraging the capabilities of MMs, organizations can enhance the accuracy and reliability of their quality control procedures, minimizing human error and improving overall product quality.

Moreover, MMs excel in executing high-precision tasks, further contributing to product quality improvement. These versatile machines possess the capability to perform intricate and delicate operations with exceptional accuracy and repeatability. Whether it involves assembling intricate components or conducting fine adjustments, MMs can navigate through tight spaces, manipulate objects with precision, and achieve the required level of accuracy that might be challenging for human workers alone. By incorporating MMs into the production process, organizations can enhance the precision and consistency of their operations, resulting in products of superior quality. By harnessing the capabilities of MMs for quality control, inspection, and high-precision work, organizations can elevate the overall quality of their products. The integration of MMs empowers businesses to streamline quality assurance processes, detect defects or deviations early on, and make necessary adjustments promptly. This, in turn, leads to reduced rework, lower product rejection rates, and improved customer satisfaction.

3.1.1.4 Automation

Conversely, in a broader sense, MMs are commonly employed to automate tasks that were previously performed manually or deemed impractical for robotic solutions. One primary objective of integrating MMs into production systems is the automation of activities that were traditionally executed by human workers. These tasks may have been physically demanding, repetitive, or time-consuming. By deploying MMs, organizations can streamline operations and improve efficiency by relieving human workers from mundane or labor-intensive activities. This allows human resources to be allocated to more valuable and intellectually stimulating tasks that require their expertise and problem-solving abilities.

Furthermore, MMs prove beneficial in situations where implementing fixed robotic solutions might not be economically viable or practical. Certain tasks may not require dedicated and specialized robotic systems due to factors such as low production volumes, frequent changes in product specifications, or spatial constraints. In such cases, MMs provide a flexible alternative that combines mobility and

3.1. PHASE I : OBJECTIVES AND APPLICATIONS

manipulation capabilities. They can navigate through dynamic environments, adapt to varying tasks, and perform multiple functions with a single setup. This versatility allows MMs to effectively address automation needs where fixed robotic systems may not be the optimal choice. By leveraging MMs to automate previously manual or challenging-to-automate tasks, organizations can unlock numerous advantages. The integration of MMs eliminates the risk of human error, enhances productivity, reduces operational costs, and optimizes resource allocation. Moreover, MMs can work collaboratively with human workers, fostering a synergistic work environment that combines the strengths of both humans and machines.

3.1.2 Defining applications

Having delved into the motivations and objectives behind the utilization of MMs in industrial environments, our focus has now shifted to the second inquiry : the various applications of MMs in the industry. According to [1], the industrial applications of MMs can be classified into three primary categories : logistics, assistive, and service. However, a more comprehensive categorization is proposed that encompasses a broader range of production operations. Instead of using the assistive category, an expanded category is suggested called production activities. Furthermore, an additional category is introduced known as innovative applications, which aligns with the transformative concepts introduced by Industry 4.0.

3.1.2.1 Logistics

The first category, logistics, revolves around the efficient management and movement of materials within industrial settings. MMs exhibit remarkable capabilities in tasks such as material transportation, inventory management, and supply chain optimization. These versatile machines navigate autonomously through the facility, precisely handling and transporting materials, and streamlining the overall material flow. By incorporating MMs into logistics operations, organizations can enhance efficiency, reduce manual labor, and achieve optimized supply chain management.

3.1.2.2 Production

Expanding beyond logistics, the proposed category of production operations encompasses a more comprehensive range of tasks. While including activities such as assembly, pre-assembly, machine ten-

3.1. PHASE I : OBJECTIVES AND APPLICATIONS

ding, and inspection, this category also encompasses activities such as drilling, grinding, screwing, welding and many others. MMs play a crucial role in these production activities by executing precise movements, applying optimal force, and ensuring accuracy and repeatability. Leveraging the capabilities of MMs in production activities enables organizations to enhance productivity, improve quality control, and foster consistency across various manufacturing processes.

3.1.2.3 Service

The service category encompasses tasks related to maintenance, repair, and overhaul as well as cleaning. MMs can be utilized in these activities to assist human workers in executing precise repairs, conducting inspections, and ensuring the smooth functioning of machinery and equipment. The dexterity and mobility of MMs enable them to access hard-to-reach areas, perform intricate tasks, and contribute to the overall effectiveness of maintenance operations.

3.1.2.4 Innovative

Lastly, the innovative applications category corresponds to the transformative possibilities introduced by the Industry 4.0 paradigm. This category embraces advanced technologies and concepts such as smart factories, CPSs, and digital integration. MMs play a pivotal role in the implementation of intelligent automation, real-time data analysis, and predictive maintenance. By incorporating MMs into innovative applications, organizations can create adaptive and agile production systems that respond to market demands, optimize resource utilization, and enable seamless integration between the digital and physical realms. Drawing inspiration from the proposed stages for Industry 4.0 development outlined by FIR e.V. at RWTH Aachen University (as depicted in Figure 3.3), a set of inquiries have been formulated aimed at assessing the role of MMs in facilitating progress across each stage, as well as identifying the crucial considerations for their integration. The initial steps in this journey are fundamental to realizing the objectives of Industry 4.0.

3.1. PHASE I : OBJECTIVES AND APPLICATIONS

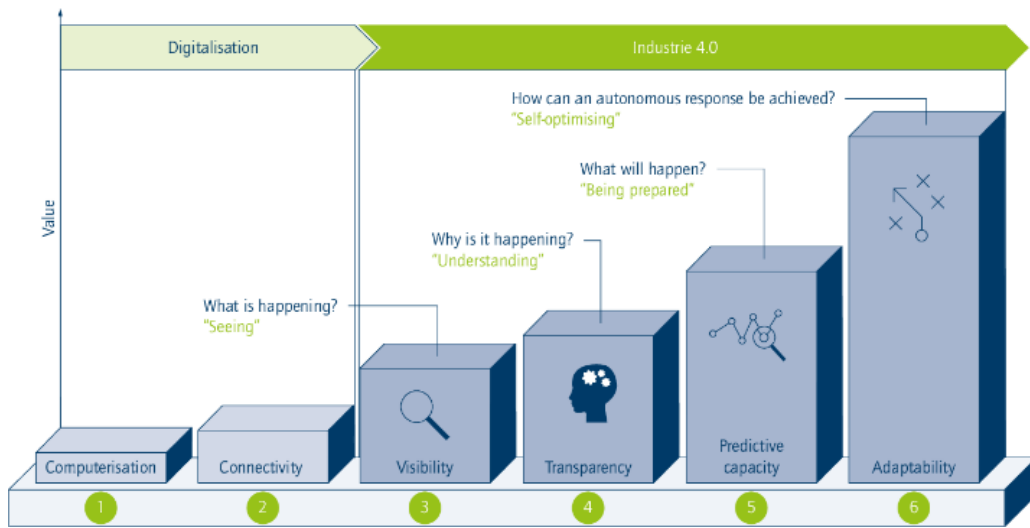


FIGURE 3.3 – Maturity levels of Industry 4.0 from FIR e.V. at RWTH Aachen University

The first set of questions revolves around the utilization of MMs within the entire system. This encompasses exploring how MMs can be effectively employed to enhance various aspects of the production ecosystem. The potential applications and benefits of integrating MMs across the entire value chain are inquired, spanning from the initial stages of material acquisition to the final stages of product delivery. By evaluating the potential of MMs to contribute to each facet of the system, organizations can uncover opportunities to optimize processes, improve efficiency, and drive overall productivity.

The second set of questions pertains to the integration of MMs in a manner that allows them to possess standalone capabilities and features. This involves considering how MMs can be seamlessly integrated into the existing infrastructure while leveraging their unique functionalities. The potential for MMs to operate autonomously, adapt to dynamic environments, and possess the ability to perform a wide array of tasks independently has been explored. By addressing these questions, organizations can determine how MMs can augment their operations, improve flexibility, and contribute to the realization of Industry 4.0 objectives. By aligning the deployment and integration of MMs with the suggested stages for Industry 4.0 development, organizations can strategically position themselves to leverage the transformative potential of these technologies. The comprehensive assessment of MMs' role within the entire system and their ability to possess standalone capabilities ensures a holistic approach to integration, enabling organizations to capitalize on the benefits of automation, connectivity, and data-driven decision-making.

3.1. PHASE I : OBJECTIVES AND APPLICATIONS

The proposed questions act as a guide, shedding light on the strategic considerations and opportunities presented by MMs at each stage of Industry 4.0 development. By addressing these inquiries, organizations can navigate the integration process more effectively, identify the areas where MMs can have the most significant impact, and chart a course toward enhanced operational excellence, increased competitiveness, and sustainable growth in the Industry 4.0 era.

Computerization

In the initial stage of computerization, organizations primarily focus on the adoption of information technologies to digitize their operations. This involves utilizing computers and software systems to automate tasks, manage data, and improve overall efficiency. However, during this stage, each device or component is treated as a separate entity, operating independently without much interaction or connectivity with other parts of the company. The main objective of computerization is to enhance productivity and accuracy by leveraging digital tools. By transitioning from manual processes to computer-based systems, organizations can streamline their operations, reduce errors, and gain better access to information. However, it is important to note that in this stage, the focus is primarily on individual devices, and there is limited communication or integration between them.

Connectivity

The connectivity and communication features of CPSs help to gather all the data in real-time from the physical components and have information feedback from the cyber world [1]. As Lee et al. [140] indicate, the comprehension of physical and computational components separately is not enough. The interaction between them is a vital aspect to understand. In Industry 4.0, connectivity is defined for all levels, from the operational production activities to the logistics systems. According to [22] a CPS connected to the internet refers to the IoT. IoT by introducing various communication protocols via the internet enables communication between the components and devices. At higher levels, this connection and communication will lead to the interoperability that enables CPSs to share information that is mutually understandable.

Visibility

Having delved into the motivations and objectives behind the utilization of MMs in industrial environments, our focus has now shifted to the second inquiry : the various applications of MMs in the industry. According to [?], the industrial applications of MMs can be classified into three primary

3.1. PHASE I : OBJECTIVES AND APPLICATIONS

categories : logistics, assistive, and service. However, a more comprehensive categorization is proposed that encompasses a broader range of production operations. Instead of using the assistive category, an expanded category is suggested called production activities. Furthermore, an additional category is introduced known as innovative applications, which aligns with the transformative concepts introduced by Industry 4.0.

Q1 : In what ways can MMs be utilized to improve visibility within industrial settings and enhance the gathering of crucial data ?

Q2 : What factors should be taken into account when integrating MMs into the system to optimize visibility and facilitate seamless data transfer ?

After establishing connectivity within the system, the next step involves collecting and monitoring data from various sources. This process serves as the foundation for subsequent actions. Sensors are widely recognized for their ability to provide real-time data, and Q1 focuses on leveraging the mobility of MMs to increase visibility. Potential answers to Q1 could involve equipping MMs with specialized sensors and deploying them to specific stages where data collection is required. Leveraging the mobility of the sensors, MMs can gather information from different locations, facilitating a comprehensive understanding of the production environment. Additionally, the use of onboard cameras allows MMs to capture visual data from specific vantage points on the production line in real-time. For instance, the camera's visibility function can provide images of the machines' electrical panels, which can then be shared for diagnosis. In the event of anomalies, the MES can dynamically schedule remote or on-site interventions.

On the other hand, implementing MMs effectively within the system requires careful consideration of their communication capabilities, which addresses the concerns of Q2. To maximize visibility and ensure efficient data transfer, it is essential to design the integration of MMs in a manner that facilitates seamless communication. This involves establishing robust communication channels, ensuring compatibility with existing systems, and enabling the smooth exchange of desired data. By strategically positioning and configuring MMs within the production environment, organizations can optimize visibility and enable effective data communication, leading to improved operational insights and informed decision-making.

Q1 and Q2 both aim to explore the potential of MMs in enhancing visibility and data communica-

3.1. PHASE I : OBJECTIVES AND APPLICATIONS

tion within industrial settings. By addressing these questions, organizations can unlock opportunities to leverage MMs' mobility, sensor capabilities, and communication infrastructure to gather critical information, improve situational awareness, and enable timely actions for enhanced operational efficiency.

Transparency

Q1 : How can MMs contribute to identifying the causes behind specific occurrences ?

Q2 : What considerations should be taken into account when implementing MMs to facilitate event comprehension ?

Transparency, which involves transforming raw data into meaningful information, is a crucial step in gaining a comprehensive understanding of events. However, in certain situations, additional information is required to uncover the root causes of specific incidents. When integrating an MM, it is possible to explore its potential as a source of supplementary information to address this need, as highlighted in Q1. For instance, leveraging the mobility of the MM to access hazardous or inaccessible areas and capture images can offer valuable insights for investigating the reasons behind events. Another approach is equipping the MM's gripper with a thermographic measuring device, enabling it to scan machines from the outside and potentially identify abnormal thermal conditions.

Q2 emphasizes the importance of the MM's inherent capabilities in providing comprehension of its own functionalities. This suggests that the implementation of MMs should consider their ability to provide real-time feedback and self-monitoring mechanisms. By equipping MMs with advanced sensors and intelligent algorithms, they can actively analyze their own operations, detect deviations or anomalies, and provide a deeper understanding of their performance and functionality.

Q1 and Q2 both explore the role of MMs in improving event comprehension. By utilizing their mobility, sensor capabilities, and specialized tools, MMs can offer valuable insights into the causes and context of specific incidents. Additionally, ensuring that MMs possess self-monitoring capabilities allows for a more comprehensive understanding of their own operations. Integrating MMs with these considerations in mind enables organizations to leverage their potential in providing enhanced event comprehension and facilitating informed decision-making processes.

Predictive capacity

Q1 : In what ways can MMs facilitate the development of a more predictive system ?

3.1. PHASE I : OBJECTIVES AND APPLICATIONS

Q2 : What considerations should be taken into account when implementing MMs to enhance their predictive abilities ?

The predictive stage plays a crucial role in preparing the system for future situations. By analyzing data and information, one can predict upcoming events and simulate the system to identify and address potential issues. To achieve this, it is important to leverage the capabilities of MMs in providing relevant data for analysis, addressing the essence of Q1. MMs can contribute to the predictive capabilities of the overall system by supplying valuable data that can be used to enhance analysis and improve future predictions.

Integration of MMs with the system's digital twin or digital shadow is of utmost importance (A digital twin is a virtual representation of a physical object or system that allows for real-time monitoring, analysis, and simulation to improve its performance and maintenance- see section 3.3.2.5). This entails ensuring that MMs are equipped to participate effectively in simulations, a key aspect addressed in Q2. Moreover, the application of artificial intelligence and machine learning technologies can be leveraged to enhance real-time analysis and comprehension of information, thus bolstering the system's predictive capacity.

Q1 and Q2 both delve into the role of MMs in advancing the predictive capabilities of the system. By harnessing their data-gathering abilities and incorporating them into simulations and analytical processes, MMs contribute to better prediction of future events. Moreover, the integration of MMs with advanced technologies enables real-time analysis and empowers the system to make informed decisions based on predictive insights. By considering these aspects during the integration of MMs, organizations can enhance their predictive capabilities, enabling proactive measures to address potential challenges and improve overall system performance.

Adaptability

Q1 : In what ways can MMs enhance the level of autonomy within the system ?

Q2 : How can MMs be effectively integrated to enable autonomous functionality ?

The final stage of development aims to establish an automatic decision-making system that can deliver self-optimizing and autonomous responses. Q1 focuses on exploring how MMs can contribute to increasing the overall autonomy of the system. One potential solution involves replacing certain manual operations that require human intervention, such as pressing a button, with the capabilities

of an MM. By assigning this task to an MM, the system becomes less reliant on physical human operators for such actions, thereby enhancing autonomy. Achieving self-optimization and autonomy necessitates a dynamic solution that takes into account various factors and identifies the best course of action based on predictions derived from simulations. The integration of MMs plays a critical role in enabling this self-optimizing behavior, aligning with the considerations posed in Q2. To enable autonomous functionality, careful integration of MMs into the system is required, taking into account their capabilities, communication with other components, and ability to adapt to changing circumstances.

Q1 and Q2 both address the role of MMs in advancing the autonomy of the system. By leveraging MMs' capabilities and assigning them tasks that were previously performed by human operators, the system becomes more self-reliant. Furthermore, by integrating MMs effectively, and considering their abilities to adapt and optimize operations based on predictive simulations, organizations can facilitate the achievement of autonomous functionality. This integration enables the system to make informed decisions and take actions independently, thereby enhancing its overall autonomy.

3.2 Phase II : Infrastructure readiness

Before introducing MMs into the production environment, it is essential to thoroughly evaluate the current landscape. Phase II takes on this critical role. The initial subphase "Pre-study" acts as a diagnostic tool, carefully assessing the current infrastructure to identify areas that might want improvement. With this thorough information in hand, the next subphase, "Infrastructure Modification and MM Selection," may be put into action. This section outlines the infrastructure changes that are required, leading to the careful selection of MMs that easily integrate with the revised environment. Building an infrastructure that is properly ready for the integration of MMs is the primary goal of this phase.

3.3 Phase II-I : Pre-study

Once the needs have been analyzed and the suitable applications of MMs have been identified, it becomes imperative to assess and verify the existing infrastructure of the production system. This initiates the subsequent phase known as the pre-study of infrastructure. During this stage, a comprehensive evaluation of the system is conducted from multiple perspectives, which can be facilitated

through the utilization of a structured questionnaire applicable to diverse systems. This questionnaire encompasses several essential sections from **general prerequisites** of the system such as the assessment of the working area and its physical attributes, the evaluation of management practices, the evaluation of production planning strategies, and the comprehensive consideration of safety aspects, to **prerequisites based on industry 4.0 core principles** such as interoperability and interconnectivity and the examination of communication and network infrastructure, the analysis of cyber security measures, the exploration of virtualization techniques, modularity and service-oriented architectures, as well as decentralization and real-time capabilities.

3.3.1 General prerequisites

3.3.1.1 Working area and physical assessment

Working area segmentation

Initially, the assumption is that the manufacturer's key segments can be categorized into three distinct sections : the warehouse, the shop floor, and the distribution section. Our primary objective is to assess whether the manufacturer has allocated separate and designated spaces for each of these sections within their facility. This ensures that each section operates efficiently and effectively without any overlapping or interference. Within each of these sections, a thorough examination is conducted to identify the specific tasks and activities that MMs can effectively undertake. For instance, in the distribution department, MMs can be utilized for tasks such as packaging, ensuring that products are properly prepared for shipment and adhering to specific packaging requirements. Similarly, in both the warehouse and shop floor sections, MMs can play a crucial role in facilitating appropriate quality inspections, contributing to the overall quality assurance process.

Furthermore, investigating which of these sections would benefit most from enhanced logistics support is the next step. By closely analyzing the logistical requirements of the warehouse and distribution sections, it can be determined whether MMs can assist in streamlining the transfer of materials and products between these departments. The goal is to identify any potential bottlenecks or inefficiencies in the logistical flow and leverage the capabilities of MMs to optimize the transfer process, ultimately improving overall operational efficiency. By thoroughly assessing the spatial allocation, identifying suitable activities for MMs, and considering the logistics needs of the various sections, the integration of MMs is ensured to align seamlessly with the specific requirements and operations of each department

3.3. PHASE II-I : PRE-STUDY

within the manufacturer's facility. This comprehensive evaluation allows us to harness the full potential of MMs, enhancing productivity, quality control, and logistical efficiency throughout the production system.

The inventory is categorized into four main categories : raw materials, unfinished parts or work-in-process inventory (WIP), defected parts, and final products. Understanding the composition and distribution of these inventory categories is crucial because MMs offer valuable capabilities in sorting, moving, and transferring materials between these inventories and different manufacturing units. The utilization and frequency of each inventory vary across different systems and manufacturing setups. Gaining knowledge about the number and arrangement of warehouses and their storage methods is essential in identifying any limitations and determining the optimal functions for MMs. Generally, warehouses are located outside the production environment, providing an opportunity to leverage MMs for internal warehouse operations and the seamless transfer of items between the warehouse and the production environment. This allows for improved inventory management and enhanced material flow control. During the production process, there is often a buffer of WIP that poses challenges for production planning and scheduling. MMs can play a significant role in addressing these challenges by assisting the system in managing and optimizing the flow of WIP. They can contribute to tasks such as organizing and repositioning WIP inventory, ensuring efficient utilization of resources, and facilitating smooth transitions between manufacturing stages. By understanding the distinct inventory categories and their respective usage patterns, as well as the potential limitations and opportunities for integrating MMs, the capabilities of MMs can be employed effectively to enhance inventory management, optimize production processes, and improve overall operational efficiency. MMs act as valuable tools for streamlining material handling operations, reducing bottlenecks, and enhancing the flexibility and agility of the manufacturing system.

Working area characteristics

Layout and area measurement

The successful integration of MMs in industrial environments requires careful evaluation of the available space, consideration of different layout configurations and technological approaches, and the identification of suitable tasks based on the arrangement and movement requirements. By adhering to these principles and accounting for broader considerations, MMs can effectively contribute to enhancing manufacturing processes, productivity, and overall operational efficiency. A fundamental consideration

is the dimensional measurement of the spaces that can be effectively utilized by MMs. This entails assessing the arrangement of machines and equipment within the manufacturing facility and evaluating the available space between them. Different factories adopt various layout configurations depending on factors such as product type, production volume, and manufacturing processes. Common layout types include Flow shop, Job shop, fixed production layout, and Group Technology (GT). GT, in particular, necessitates the implementation of specific tools and methodologies to optimize operations. Examples of these tools include Cellular Manufacturing Systems (CMS), Flexible Manufacturing Systems (FMS), Lean Production, and Agile Production. Each layout, coupled with its corresponding technology, presents unique opportunities for the application of MMs.

By carefully analyzing the layout and spatial considerations, it becomes possible to identify areas where MMs can contribute effectively, such as material handling, transportation, assembly, and other related tasks. The selection and configuration of MMs must align with the specific layout and technological requirements of the manufacturing environment, ensuring optimal utilization of these mobile devices[141]. Beyond the aspects related to production technology and machinery, another critical factor that significantly influences the selection of an appropriate MM is the working environment in which it will operate. Various environmental conditions must be considered to ensure optimal MM performance and compatibility. For instance, the smoothness or roughness of the surface on which the MM will navigate can impact its mobility and stability. Moreover, determining whether the MM will predominantly function indoors or outdoors is crucial, as outdoor environments may expose the MM to different weather conditions and potential obstacles. Additionally, the presence of a clean room requirement further dictates the specifications and suitability of the MM for the designated environment.

Object characteristics

Understanding the characteristics of the parts that are intended to be manipulated by MMs holds significant importance in the selection process. Several key aspects, such as the geometric shape, dimensions, and weight of the parts, play a pivotal role in determining the appropriate end-effector for the MM. By considering these factors, it becomes possible to ensure that the chosen MM is equipped with the necessary capabilities to handle the specific requirements of the tasks at hand. The geometric shape of the parts influences the design and configuration of the end-effector, as it directly affects the gripping or manipulation strategy employed by the MM. Parts with irregular or complex shapes may

necessitate specialized grippers or tooling attachments to enable effective handling and manipulation. Similarly, the dimensions of the parts determine the reach and dexterity required from the MM to access and maneuver them within the production space. By carefully analyzing the size of the parts, it becomes possible to identify the optimal MM with the appropriate reach and range of motion.

Additionally, considering the weight of the parts is crucial in determining the maximum payload capacity that the MM should possess. This parameter ensures that the MM is capable of safely and efficiently handling the specified loads without compromising its stability or performance. By evaluating the weight of the parts, it becomes possible to match it with the maximum payload capacity of the MM, thereby ensuring a suitable and safe working environment.

3.3.1.2 Production plan

For an existing production system, the integration of MMs necessitates a comprehensive understanding of the integrated production plan and operations scheduling. This critical aspect underscores the need for careful study and preparation in this domain. In an active production system, all activities are intricately interconnected, guided by precise timing, and characterized by well-defined roles and responsibilities for each component. Thus, introducing new operations involving MMs into the production schedule, or substituting existing machines or personnel with MMs, requires a thorough comprehension of the current production plan while simultaneously envisioning future programming requirements.

Effectively integrating MMs into the production system necessitates valuable insights derived from the feedback loop of the production plan. This feedback allows for the identification of potential areas for improvement within the existing processes, which can be addressed through the integration of MMs. Consequently, a deep understanding of the last production plan, combined with a forward-thinking approach, paves the way for leveraging MMs' capabilities to enhance and optimize various operations. By recognizing the layout and production plan, it becomes possible to discern the flow of materials within the system. It is at this stage that MMs can play a pivotal role, particularly in facilitating logistics activities between different operations. A comprehensive study of these material flows, coupled with the creation of a schematic representation, offers a valuable analytical tool for identifying optimal placements for MMs within the production system. By carefully analyzing and visualizing the material flows, potential bottlenecks or inefficiencies can be identified, leading to informed decisions regarding

3.3. PHASE II-I : PRE-STUDY

the placement and utilization of MMs. This analysis contributes to identifying areas where MMs can streamline material handling processes, optimize resource allocation, and improve overall operational efficiency.

Having a clear understanding of when to employ MMs is instrumental in determining the battery requirements for their operation during each work shift. This knowledge plays a crucial role in selecting the appropriate type and quantity of MMs necessary for each specific production system. By assessing the usage patterns and work shifts within the production environment, it becomes possible to estimate the duration and intensity of MM usage throughout the day. This information aids in determining the battery capacity needed to sustain the desired level of MM functionality during operational hours. For instance, if the production system operates on multiple shifts or experiences extended working hours, MMs may require larger or multiple batteries to ensure uninterrupted operation throughout the designated timeframes. Furthermore, understanding the specific tasks and activities that MMs will be involved in allows for a more accurate assessment of their battery consumption. Different tasks may vary in terms of energy demands, depending on factors such as the complexity of manipulation, distance traveled, and the use of additional sensors or tools. By comprehending the requirements of each task, it becomes feasible to estimate the battery life required for successful completion.

3.3.1.3 Managerial consideration

Gaining a comprehensive understanding of the infrastructure of the existing production system necessitates delving into various management considerations. These considerations encompass vital aspects such as system control, supervision, and the envisioned future state of the production system. Acquiring this knowledge becomes pivotal for the seamless integration of MMs and ensuring their successful implementation within the production environment. One of the key management considerations involves determining how the existing production system is controlled and supervised. This entails examining the current mechanisms in place for overseeing and coordinating the activities of different components within the system. Understanding the control hierarchy, decision-making processes, and communication protocols enables a more informed approach to integrating MMs. By aligning the functionalities of MMs with the existing control framework, a harmonious integration can be achieved, avoiding conflicts or disruptions in the overall production process. Furthermore, having a future-oriented perspective for the production system is crucial in the integration of MMs. This entails

3.3. PHASE II-I : PRE-STUDY

envisioning the desired state of the production system and identifying the strategic goals and objectives to be achieved. By aligning the integration of MMs with the future vision, manufacturers can ensure that the implementation of MMs contributes to the long-term success of the production system. This may involve considering factors such as scalability, flexibility, adaptability, and the potential for future advancements in technology.

Additionally, understanding the management considerations provides valuable insights into the broader implications of integrating MMs within the production system. It enables manufacturers to assess the impact on workforce management, resource allocation, skill requirements, and training needs. Furthermore, it facilitates the identification of potential challenges and risks associated with the integration process, allowing for proactive mitigation strategies to be devised. Moreover, considering the management aspects allows for the exploration of opportunities for process optimization and continuous improvement. By aligning the integration of MMs with existing management systems, manufacturers can leverage the capabilities of MMs to enhance productivity, quality, and efficiency. This may involve re-evaluating and redefining standard operating procedures, streamlining workflows, and reassigning tasks to leverage the strengths of MMs in performing repetitive, labor-intensive, or hazardous activities.

3.3.2 Prerequisites based on the principles of Industry 4.0

3.3.2.1 Decentralization and autonomous decisions

In centralized production planning and control, all the decision-making authority is concentrated in one central control unit. This unit takes on the responsibility of planning and scheduling different production orders, which are then passed on to the machines for execution [142]. Hierarchical architectures are being used for centralized systems to get all data from one single source, facilitating global optimization. Centralized production planning and control have limitations when it comes to handling dynamic situations [143]. It may lead to significant deviations from the original plan, requiring the entire schedule to be replanned. Since decision-making is centralized, individual machines lack the ability to make immediate corrections. Furthermore, planning data can become outdated as it moves through hierarchical levels. As a result, centralized production systems are inflexible and face limitations in adapting to changes.

The consideration of decentralized systems in production control is a result of the requirement for

3.3. PHASE II-I : PRE-STUDY

more reactive strategies and shorter feedback loops. Decentralized techniques, in contrast to centralized approaches, transfer decision-making authority to the various components of the production system, such as machines or products, enabling them to act independently without a central control unit. Effective communication between the components is essential because they need to have access to relevant data for decentralized decision-making to successfully take place. Heterarchical designs are frequently used to implement decentralized techniques structurally. Due to the small scope of each decision, calculations need less processing, which reduces computational effort. Regular replanning in decentralized systems improves the quality of production control while also boosting accuracy and transparency through fast data collection at the shop floor level. However, since they could put their own objectives first, the separate components must coordinate more effectively to avoid impeding the system's overall optimization. Hybrid techniques were developed to blend the advantages of centralized and decentralized approaches. As a result, hybrid models incorporate both autonomies at the shop floor level and some amount of hierarchy and top-down management by a higher entity. The hierarchical approach's rigid communication direction is removed. The elements, however, have a limited capacity for independent thought.

In order to promote decentralization in the integration of the MMs following considerations should be taken into account : The distribution of the control and decision-making authority in the whole system is one the most important factors [144]. The level of independence and decision-making abilities of the MM itself, the ability to adapt and act independently within defined parameters and without fixed central control should also be evaluated. Establishing a knowledge-sharing system with proper communications with other agents and system components is necessary to exchange information and coordinate operations. Facilitating local decision-making and minimizing the need for central data processing, increases the speed of data processing and analysis, and provides the ability to process data in real-time. Paying attention to the position of employees to participate in decentralized decision-making processes related to MMs is also important. Training programs and necessary skills development are necessary to ensure that employees have the knowledge and capabilities to make informed decisions. For a decentralized integration, task and resource allocations need to be decentralized as well.

3.3.2.2 Interoperability and interconnectivity

Interoperability refers to the capacity of different components or equipment to connect and share meaningful information with one another. Standardized communication protocols, data formats, and command structures are required for a seamless data exchange between different components. Ensuring that MMs and other CPSs support common communication protocols such as OPC UA, MQTT, etc., and generally, compatibility with the whole existing system and other components is a vital step. The potential of system interoperability rises with adherence to industry standards like ISO, IEE, etc., which also aids in the most efficient data transfer. Evaluating the strengths and weaknesses of the IT, communication, and network architectures within the production system is a key analysis of the system. This evaluation includes identifying the necessary equipment or systems that the MM needs to integrate with, understanding the supporting communication protocols within the enterprise, and determining the stability and coverage of the Wi-Fi network throughout the facility. These considerations are especially critical for the successful operation of mobile equipment like MMs, as they heavily rely on a reliable and suitable wireless network.

When discussing communication and the network infrastructure, it encompasses all components within the system, ranging from machines and sensors to human operators. Recognizing that humans are integral components of the production system allows us to consider their specific needs for communication and interaction. Understanding the knowledge and expertise of human operators, as well as the nature of their activities and the level of communication required, enables us to design the most optimal interface and develop appropriate programming techniques to facilitate effective communication between humans and MMs. Furthermore, it is essential to assess the stability and coverage of the Wi-Fi network throughout the production environment. Given the mobility of MMs, a stable and robust wireless network is vital for seamless communication and control. Evaluating the reliability and extent of the Wi-Fi coverage helps identify any potential gaps or areas with weak signal strength. By addressing these issues, such as deploying additional access points or optimizing network configuration, uninterrupted connectivity for MMs and support for their effective operation within the production system can be ensured. On the other hand, other wireless data transmitters like 5G networks [145] designed for a wider area and wider range of frequencies could offer higher speeds and lower latency compared to many current Wi-Fi setups. Combining 5G technology and a Wi-Fi network for increasing coverage distance in industrial environments is investigated by M. Khadmaoui-Bichouna et al. [146].

3.3.2.3 Modularity

A component-based design approach is the foundation for achieving modularity. By breaking down the system into distinct modules that can be independently developed, tested, and maintained, the company can enhance flexibility and adaptability [147]. Standardized interfaces and their compatibility with other modules and CPSs are the next vital factor. The idea of modularity is to define the modules that are scalable for a flexible configuration and can be easily replaced or upgraded without major disruptions to the whole system [148]. As the term plug-and-play capability that refers to connecting, configuring, and reconfiguring the modules without significant downtime or modification of the whole system [149]. As an example, for maintenance and repair of the modules, they need to be accessible, replaceable, and capable of maintenance without affecting the performance of the overall system. Each module should benefit from local control while preserving system coordination as a whole through defined interfaces and communication protocols. Compatibility with the existing system, and standardized communication protocols as well as verifying the functionality of each module lonely and while collaborating with other components are the next important aspects.

3.3.2.4 Real-time Capability

In order to achieve MM integration with real-time capabilities, the first importance is sensor integration and perception. Proper types of sensors required for MM and other CPSs and environment capable of exchanging relevant data in real-time is the first step [150]. Implementing high-speed data acquisition systems and communication protocols to transmit data from the MM to the central controlling system (MES) and other components. In addition to the speed, reliability, and robustness of communication infrastructures is important that handle the volume and speed of data generated by MMs in real-time. Real-time capability not only refers to transferring data rapidly but also to processing and analyzing it effectively as well. Algorithms and software tools should be installed to obtain useful information from the data produced by the MMs. The data and analytics could be shown as a dashboard enabling real-time monitoring of key performance indicators (KPIs) and any other required information in a graphical way. Next, it is important to implement a data storage infrastructure capable of handling and storing large volumes of real-time data generated by the MMs. databases or data management systems that are designed to store data in real-time while also historizing it for subsequent analysis and trend detection are useful. Integrating of real-time capabilities of MMs into

3.3. PHASE II-I : PRE-STUDY

central controlling systems such as MES and ERP assists in supporting real-time decision-making, planning, or resource allocation. Through this monitoring real-time performance of the MM could be also accessible which is an advantage to alert the system about malfunctions, maintenance needs, or any unexpected event. Implementing robust security measures to protect the real-time data generated by MMs from unauthorized access or manipulation is a vital consideration. As part of the pre-study process, it is crucial to thoroughly review the existing system's protective infrastructure before integrating a new MM. This assessment involves examining various aspects, including the system's overall security framework, potential risks and vulnerabilities, and the location and method of data storage. Specifically, in the case of MMs, particular attention should be given to the global and local Wi-Fi network infrastructure, as it plays a significant role in facilitating seamless communication and data transfer. By carefully considering these factors, organizations can proactively address cyber security concerns and mitigate potential risks associated with MM integration, ensuring the safe and secure operation of the production system in the era of Industry 4.0. Edge computing approach also developed high-speed infrastructures that provide real-time capabilities that can be considered.

3.3.2.5 Virtualization

For integration of MMs into a virtualized existing system, compatibility of MM with the virtualization platform as well as hardware and software requirements should be assessed. Necessary drivers should be installed and necessary resources should be assigned to the MMs such as CPU cores or disc space. Virtual networking of the MM should also defined and configured in case of adding routers or switches, the virtual representative of them needs to be created. The current state and level of the virtual environment of the manufacturing system should be identified as well as the main objectives of the virtual system. Different levels of virtualized environment could be classified into digital model, digital shadow, and digital twin. The definition of a digital model is a digital representation of an existing or planned physical item ; a digital model must not automatically exchange data with its real counterpart. This indicates that when the digital model is generated, any changes made to the actual system have no impact on the digital model and vice versa. Simulations can be done within a digital model. Digital shadow, on the other hand, supports a one-way automatic data flow from the physical objects to the digital one. Thus, in the case of changing the physical system, the digital shadow would change as well. However, the inverse flow does not automatically exist at this level. Lastly, a digital

3.4. PHASE II-II : INFRASTRUCTURE MODIFICATION AND MM SELECTION

twin provides data flows in both directions giving the ability of real-time monitoring and controlling the system.

3.3.2.6 Service orientation

Service-oriented architecture (SOA) implementation is now an established approach to help businesses gain considerable benefits, such as enhanced agility and efficiency, better usage of current resources, and more flexibility, and better prepared to react to market shifts. In this approach, individual services are defined that can be developed, deployed, and maintained independently. For a service-oriented integration of MMs into production systems, identifying the services that MMs can provide within the manufacturing system is the first step. Services should be designed to be reusable to use for multiple processes. Service compatibility and the capability to be updated, replaced, or modified based on changing production requirements is also important. Then service discovery and registry help the other services and components identify and recognize the new services. With this process, the capabilities, objectives, and locations of new services are accessible to the system. Now that new services are defined and identifiable to the system, service orchestration should be enabled to coordinate the execution of services and manage the flow of data among them. Different services could be gathered together to provide desired production processes. Communication protocols between services should be established to ensure seamless interaction and collaboration among them. Verifying the characteristics of the MM services such as performance, availability, reliability, scalability, and resilience is important which is in the context of service-level agreements (SLA) [151]. However, a monitoring system to track these characteristics should be implemented as well as a source of information in case of failures. For MM services, different levels of access and security could be defined in case of sensitive data.

3.4 Phase II-II : Infrastructure modification and MM selection

Based on the analysis of the characteristics of the existing production system, as proposed in phase II-I, the required modifications to the system can be realized, also the most suitable MM could be selected to fit the physical area and needs of the system. The successful integration of an MM into an existing system within the context of Industry 4.0 often necessitates a series of modifications to ensure compatibility and readiness. This section focuses on outlining key modifications required to prepare the

3.4. PHASE II-II : INFRASTRUCTURE MODIFICATION AND MM SELECTION

existing system for the seamless integration of an MM. The modifications encompass various aspects, including communication infrastructure, sensor integration, safety enhancements, power and energy management, control and integration software, workspace adaptation, workflow, and task planning, as well as training and skill development. The communication infrastructure should be evaluated and upgraded to support efficient data exchange between the MM and other system components, incorporating suitable communication protocols and standards. Additionally, integrating appropriate sensors enables the MM to perceive and respond to its environment effectively. Safety enhancements involve implementing measures to ensure the coexistence of human operators and the MM, including safety barriers, emergency stop systems, and compliance with collaborative robot safety standards. Evaluating and addressing the power supply infrastructure ensures that it can meet the energy requirements of the MM, potentially requiring the installation of additional power outlets or charging stations. The existing control systems and software architecture should be analyzed to ensure compatibility and enable seamless integration. Workspace adaptation may involve rearranging equipment and modifying workstations to accommodate the MM's operational needs. Optimizing workflows and task planning procedures ensures efficient task allocation between human operators and the MM. Finally, providing appropriate training programs facilitates operator and maintenance personnel competence in operating, programming, and maintaining the integrated MM system. By meticulously considering and implementing these modifications, the existing system can be suitably prepared and rendered ready for the integration of an MM within the Industry 4.0 context, fostering improved productivity and operational efficiency.

This analysis can help to characterize the suitable MM and encompass aspects such as the maximum payload capacity, which determines the weight limitations the MM should be capable of handling. The end-effector selection is another important consideration, as it dictates the type of tool or gripper required for effective manipulation within the production system. The maximum required reach defines the spatial extent that the MM needs to cover, ensuring it can access and operate within the desired areas. The required degrees of freedom (DoF) refers to the specific range and types of motions needed for performing tasks accurately and efficiently. The vision system and sensors play a vital role in providing perception and environmental awareness to the MM. The required speed reflects the desired operational pace within the production system, influencing the selection of an MM that can meet those speed requirements. The required mobility type considers factors such as the floor plan and operational

constraints, determining the appropriate mobility capabilities of the MM. Accuracy level requirements address the precision needed for tasks, such as positional accuracy and repeatability. Finally, battery capacity is a crucial consideration to ensure uninterrupted operation and sufficient power supply for the MM. By carefully analyzing and understanding these factors, the integration process can identify and select the most suitable MM that aligns with the specific needs and characteristics of the existing production system.

3.5 Phase III : Integration

This phase helps to integrate MMs as well as possible by having the comprehensive and mature information obtained in the previous phases. The whole integration method is separated into four categories : Physical integration, Communicational integration, Functional and operational integration, and Digital integration. In this section, different categories and different layers of them are presented.

3.5.1 Integration types

3.5.1.1 Physical integration

At the heart of physical integration is ensuring that MMs can effectively navigate the unique complexities of a designated workspace. Even though MMs come pre-equipped with navigational capabilities, introducing them to a new environment often necessitates calibration and fine-tuning. This process involves mapping the industrial environment and feeding this information to the MM, optimizing its path-planning algorithms. Such calibration might include defining speed control zones in more sensitive areas, like near heavy machinery or human-operated stations. These zones would automatically reduce the MM's speed to ensure safety and precision in operations. Further adjustments could involve setting up prohibition zones. These are designated areas that, for a variety of reasons— safety, operational logistics, or the presence of delicate equipment—the MM should not traverse. Examples include specific doors meant for human operators, areas with high pedestrian traffic, or spaces with equipment that could be potentially hazardous for an MM. Moreover, the mechanical alignment of the MM with current tools and equipment is crucial. It is essential for the MM to seamlessly engage with these components, which might necessitate specialized mechanical interfaces or adapters. In accordance with established robotic safety protocols, MMs must employ their sensors to consistently

gauge their surroundings, guaranteeing safety, particularly when human-robot collaboration is in play. Additionally, the ergonomic implications of introducing MMs cannot be overlooked. Their incorporation should enhance the workplace for human operators, requiring careful consideration of elements like operational noise, movement speed, and other potential disruptions.

3.5.1.2 Communicational integration

In the realm of Industry 4.0, achieving a seamless interaction between devices and humans is not just about technology; it is also about strategic choice points that facilitate operational efficiency. The integration of MMs according to this framework requires a three-pronged approach, each of which focuses on an aspect of communication. First, there is the interaction between the MM and the core controlling systems that govern an industrial setup. Second, it is about peer-to-peer communication between MMs and other machines, fostering real-time responses and streamlined operations. Lastly, at the heart of any production environment are the humans who navigate these tools, making the Human-Robot interaction indispensable. Together, these three facets – the Supervisory and Controlling System, the Multi-agent System, and Human-Robot Collaboration – form the backbone of our Communicational Integration strategy.

Supervisory and Controlling System

Every production environment leans heavily on its controlling system, which takes the helm in orchestrating planning and management tasks. This is driven by order data from clients, ensuring optimal utilization of resources like personnel, raw materials, and infrastructure. Predominantly, industries leverage a centralized control system, orchestrating a symphony of interconnected devices. The key contemplation lies in MM's integration. MMs possess their own PLCs, which govern both their mobile platforms and arms. A pressing decision is whether MMs should operate autonomously through their PLCs or if they should be tethered to the central control system. A potential middle ground also emerges a hybrid system that strikes a balance between autonomy and central command. The hypothesis suggests that a direct PLC-to-Control System connection could bolster performance and flexibility. Yet, for utmost adaptability in the face of varying production plans, foundational and standardized programming for MM is indispensable.

Multi-agent system (MAS)

Within this layer, there's a focus on discerning machines that might need to communicate directly with the MM. For instance, an MM might deposit a part at a designated location. This action can be directly perceived by a subsequent robot, indicating its turn to perform its task, or by another MM signifying space occupancy. Such direct interactions could, in specific scenarios, streamline operations, rendering them both faster and more efficient.

Human-robot collaboration

The evolution of a production environment is not solely about machines; it is also about the humans steering them. As MMs are ushered in, it is vital to craft interfaces that facilitate seamless human-robot communication without compromising safety. Additionally, the success of this integration hinges on the proficiency of human operators. Comprehensive training sessions need to elucidate MM capabilities and constraints, empowering operators to harness the MM's potential safely and effectively.

3.5.1.3 Functional and operational integration

Beyond just being present and communicating, the MM should perform its tasks seamlessly, be it picking, placing, assembly, or any other operation. It should also align with human workers, if any, without causing disruptions. Effective programming of MMs plays a pivotal role in harnessing their full potential. Utilizing high-level programming interfaces, made possible by advancements in AI and machine learning, enables quicker task design and offers the flexibility of real-time modifications. Embracing task parameterization ensures that MMs can adapt based on changing variables rather than operating in fixed patterns. An emerging trend is that some MMs can learn tasks by observing humans or other robots, sidestepping intensive manual programming.

The introduction and implementation of standardized tasks elevate the flexibility and operational efficiency of MMs. By deconstructing complex tasks into simpler, modular components, MMs can seamlessly handle a diverse range of activities. For example, having a readily available library of standardized behaviors, like picking up objects or following predetermined paths, expedites the deployment or repurposing of an MM in dynamic production environments. Essential to this framework is the integration of robust error-handling routines, ensuring that MMs can navigate unexpected scenarios, either autonomously resolving the challenge or signaling for assistance.

3.5. PHASE III : INTEGRATION

A tangible benefit of such standardized tasks is the interchangeability it offers. In scenarios where an MM is offline for maintenance or troubleshooting, another can effortlessly take its place, ensuring minimal disruptions. This transition is further smoothed by the adoption of standard communication protocols, fostering seamless interaction between MMs and other devices or systems within the production landscape. In fact, while the foundation of an MM's efficiency is rooted in meticulous programming, it is the strategic incorporation of standardized tasks that amplifies its flexibility and adaptability in diverse manufacturing scenarios.

3.5.1.4 Digital integration

In the context of Industry 4.0, ensuring that the MM is integrated into the digital twin, data analytics platforms, or any other digital infrastructure is vital. This will aid in real-time monitoring, optimization, and decision-making. The Internet of Things (IoT) further enhances digital integration. With embedded sensors and communication modules, MMs can send continuous streams of data, crucial for real-time decision-making, adaptive task allocations, and predictive maintenance. This data also feeds into the Digital Twin, ensuring its accuracy and relevance.

Moreover, digital integration facilitates the smooth interoperability of MMs with other digital systems, such as Manufacturing Execution Systems (MES) or Enterprise Resource Planning (ERP) systems. This ensures that tasks assigned to MMs are in sync with broader manufacturing goals and inventory management. For instance, if an ERP system indicates a shortage of a particular component, an MM can be digitally instructed to prioritize tasks related to that component's production or assembly. Another critical dimension is cloud integration. Storing and processing data on the cloud allows for advanced analytics, remote monitoring, and the ability to quickly scale operations up or down based on demand. It also enables the deployment of advanced AI algorithms that might be computationally intensive, enhancing the MMs' adaptability and decision-making prowess.

For digital integration of MMs, the following steps are proposed to take. 1. Clearly define the objective of MMs in the system. 2. Analyzing the existing infrastructures and how it is organized, including the hypervisor, virtual machines, networking setup, and management tools. Level of virtualization, and objectives for the system, the platforms that are used for developing virtualization. Thoroughly investigating the virtualization platform being used or considered for integration. Understand its features, limitations, and available application programming interfaces or software development kits for

3.5. PHASE III : INTEGRATION

MM integration. 3. Determining objectives of the existing virtual system and defining the objectives of integrating the MM into the virtualized environment. 4. Evaluating the virtualization platform's and the MM's compatibility. Figuring out if the hardware interfaces, control systems, and communication protocols of the MM are compatible with the virtualized environment. Confirming the availability of the necessary software and driver components. 5. Ensuring the security system of connections, networks, and data. 6. Bridging the gap between the MM's native interfaces and the virtualization platform. Facilitating the communication of MMs and the digital twin using proper communication protocols and standard data types and formats. required controlling algorithms of the robotic arm, mobile robot navigation algorithms, and algorithms that are used to process and interpret the data captured by the arm's sensors (e.g., cameras, depth sensors) and the mobile robot's sensors (e.g., LIDAR, odometry). These algorithms may include object detection, recognition, tracking, or environmental mapping techniques. They help extract meaningful information from sensor data, enabling the virtual representation to perceive and interact with the environment. 7. Coordination and control integration of MMs on the digital twin platform.

3.5.2 Integration Types and Industry 4.0 Principles : A Synergistic Framework for Modern Manufacturing

Figure 3.4, explored the symbiotic relationship between different integration types and the foundational principles of Industry 4.0. Each integration type interacts with multiple Industry 4.0 principles, collectively contributing to the dynamic, interconnected nature of modern manufacturing. Physical integration stands as a testament to the concept of modularity. Within this type of integration, components are crafted to be easily added, removed, or adjusted. This design philosophy enables manufacturers to swiftly customize their production environment, adapting effortlessly to shifting demands or requirements.

On the other hand, communicational integration places a spotlight on the principle of interoperability. Here, systems, devices, and interfaces are designed to communicate in a seamless manner, breaking down barriers and ensuring cohesive data exchange. This seamless communication further gives rise to decentralized decision-making, where individual devices or components interpret data autonomously. Such decentralization enables them to make swift, localized decisions. Moreover, the essence of real-time capability is also rooted in communicational integration. With the power of instantaneous data

3.5. PHASE III : INTEGRATION

transmission, the entire manufacturing system gains the capability to function based on current, live insights. Functional and operational integration brings forth its own set of unique characteristics. Modularity, once again, is a pivotal principle here, as tasks within this integration are segmented into modular units. This allows for an agile reassignment of tasks in response to the ever-evolving demands of manufacturing. Additionally, feedback mechanisms intrinsic to this integration facilitate the relay of real-time data, ensuring immediate adaptations and well-informed decision-making. Another significant highlight of functional and operational integration is its service orientation. MMs, for instance, offer specialized applications or functions that can be invoked and adapted to suit specific operational requirements.

Digital integration, the cornerstone of modern manufacturing evolution, is deeply intertwined with the principle of virtualization. Entities such as Digital Twins exemplify this principle. These virtual counterparts allow for in-depth simulations, forecasts, and decision-making processes without imposing any disruption to the actual physical operations. But, much like other integrations, digital integration isn't immune to the need for interoperability. Different software systems, tools, and platforms are harmonized to interact seamlessly, ensuring an unbroken chain of data exchange. Furthermore, with the support of cloud-based resources, digital integration possesses the aptitude to process data in real time, translating insights into actionable steps promptly.

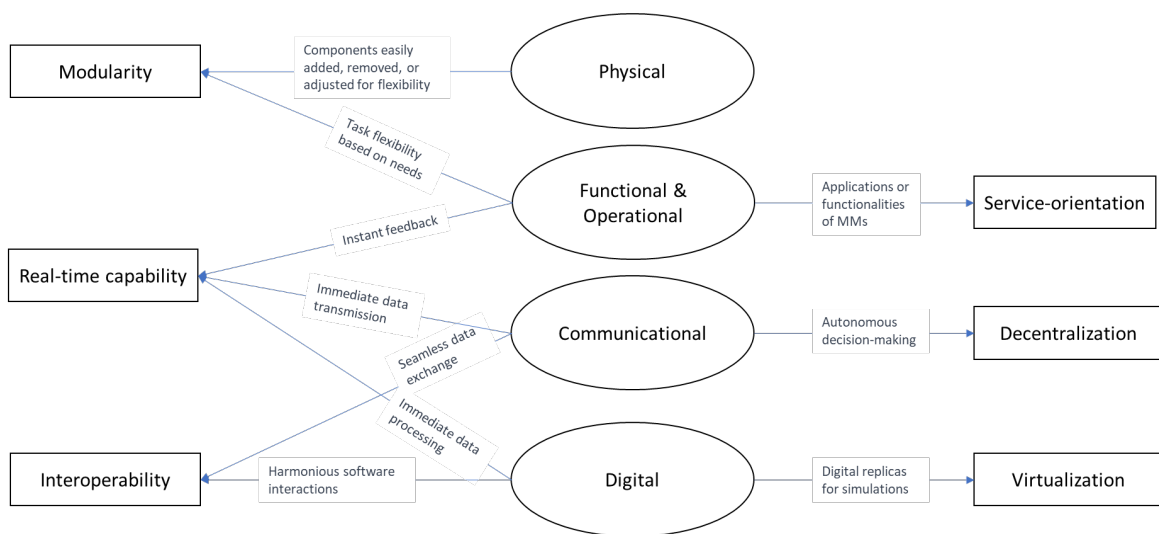


FIGURE 3.4 – the symbiotic relationship between different integration types and the foundational principles of Industry 4.0

3.5. PHASE III : INTEGRATION

Based on the analysis of different layers of integration and their interconnection with industry 4.0 main features an architecture is proposed in the next section.

3.5.2.1 A modular service-oriented architecture with adaptive decentralization based on real-time interoperability and virtual capabilities (MSOA)

Addressing the inadequacies of traditional centralized frameworks, our proposed architecture integrated a modular service-oriented design offering both scalability and flexibility. This flexibility allows for real-time adjustments in response to production changes, while built-in adaptive decentralization ensures timely and localized decision-making and reduces common bottlenecks. For a modular integration of MMs, the following modular definitions are proposed. Firstly, the hardware and software modules of MMs should be defined in general. Each MM contains a mobile platform, a robotic arm, and a PLC. However, the arm is usually equipped with a proper tooling system and the whole system is equipped with vision and perception systems such as cameras and sensors. For each of these modules software could be assigned or some of them may share the same interface. In addition to physical modules, it is possible to define functional modules for MMs as well. The functional modules of an MM could be categorized into communication, control, perception, and task execution. Each of which stands for a different stage of integration. Then, interfaces and interactions between the existing system and the new MM should be determined. This comprises the command structures, data formats, and communication protocols required for efficient interaction. Creating adaptation modules is the next step. These modules can assist in converting and translating the data and commands and ensuring interoperability among MM and other systems.

For a service-oriented integration of MMs, the following steps are proposed. 1. Service identification : identifying the applications that the MM will do in the system. The main applications and missions are considered services that could be utilized by different departments of the system. 2. Service decomposition : the objective of this step is to break down the applications into standard operations which contain basic tasks. 3. Service detailing : for the defined tasks in the previous step, the required interface, input, output, and parameters should be determined. 4. Service discovery : this step assists in introducing the MM to the other components so that the system can see and interact with the MM. The top section of Figure 3.5 presents a high-level representation of the various modules and services that are integrated into the proposed architecture. In contrast, the lower part provides

3.5. PHASE III : INTEGRATION

detailed visualization and provides deeper insight into the complexities and interconnections of system components.

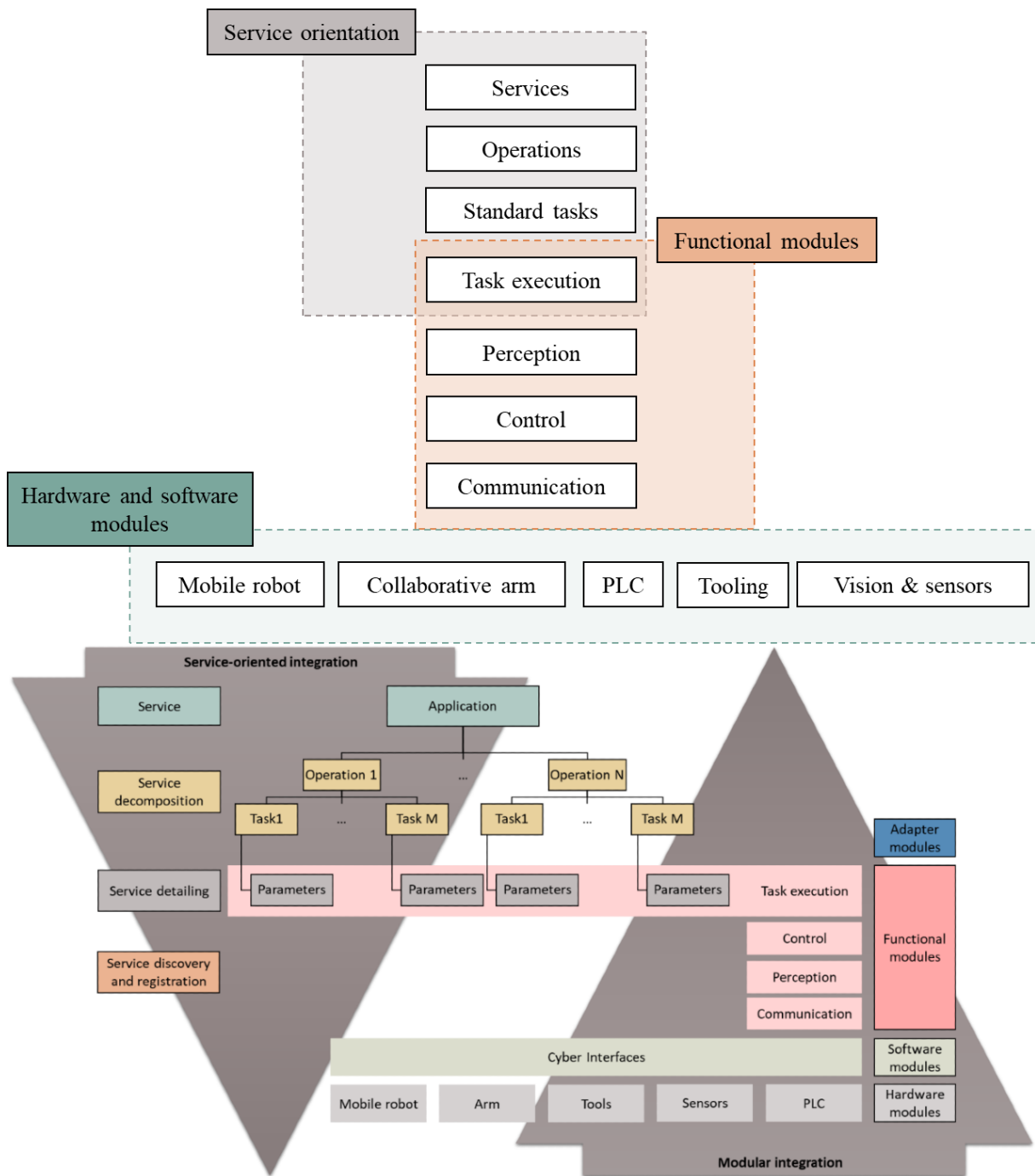


FIGURE 3.5 – On the top, is a high-level representation of the various modules and services ; On the bottom, is a detailed visualization of the complexities and interconnections of system components.

Auxiliary tools for proposed architecture

Communication protocols

A robust and suitable communication and network infrastructure are essential for the effective implementation of the majority of Industry 4.0 principles. It serves as the backbone of the technological advancements and transformative capabilities that Industry 4.0 offers, enabling efficient operations, enhanced productivity, and the realization of the full potential of smart manufacturing and digital transformation. For an interoperable integration, standardization and compatibility are the cores. Standardized communication protocols, harmonized data formats, compatible messages, and commands that are compatible with industrial standards are vital. On the other hand, for a decentralized architecture processing and analyzing data in real time is essential. For an integration with real-time capabilities again it is important to wisely select communication protocols capable of handling high volumes of data with high speed.

Adaptive decentralization

Depending on a range of specific indicators, the need for decentralization can vary significantly across services. With this in mind, the following chart shown in Figure 3.6 is designed as a tool. It provides insights into the suitability of decentralization for each service with different scenarios and situations. This tool assists in making an informed choice, creating the right balance between centralized, hybrid, and decentralized frameworks, tailored to the unique demands of each service.

One of the most important achievements of the system by adopting a decentralized architecture is increasing flexibility. If services are expected to evolve or adapt quickly to changing scenarios, decentralized or hybrid systems might be more suitable. If the service demands quick decision-making based on real-time data, a decentralized approach may be more effective due to reduced latency. However, suitable infrastructures such as communication protocols with the ability to transfer high-volume data rapidly are necessary to provide a decentralized architecture as mentioned in the previous section. The more independent services are or contain more data, the more recommended it is to use centralized architectures, as for sensitive and critical services where no error is acceptable, or in terms of security, services that contain sensitive information that should not be leaked.

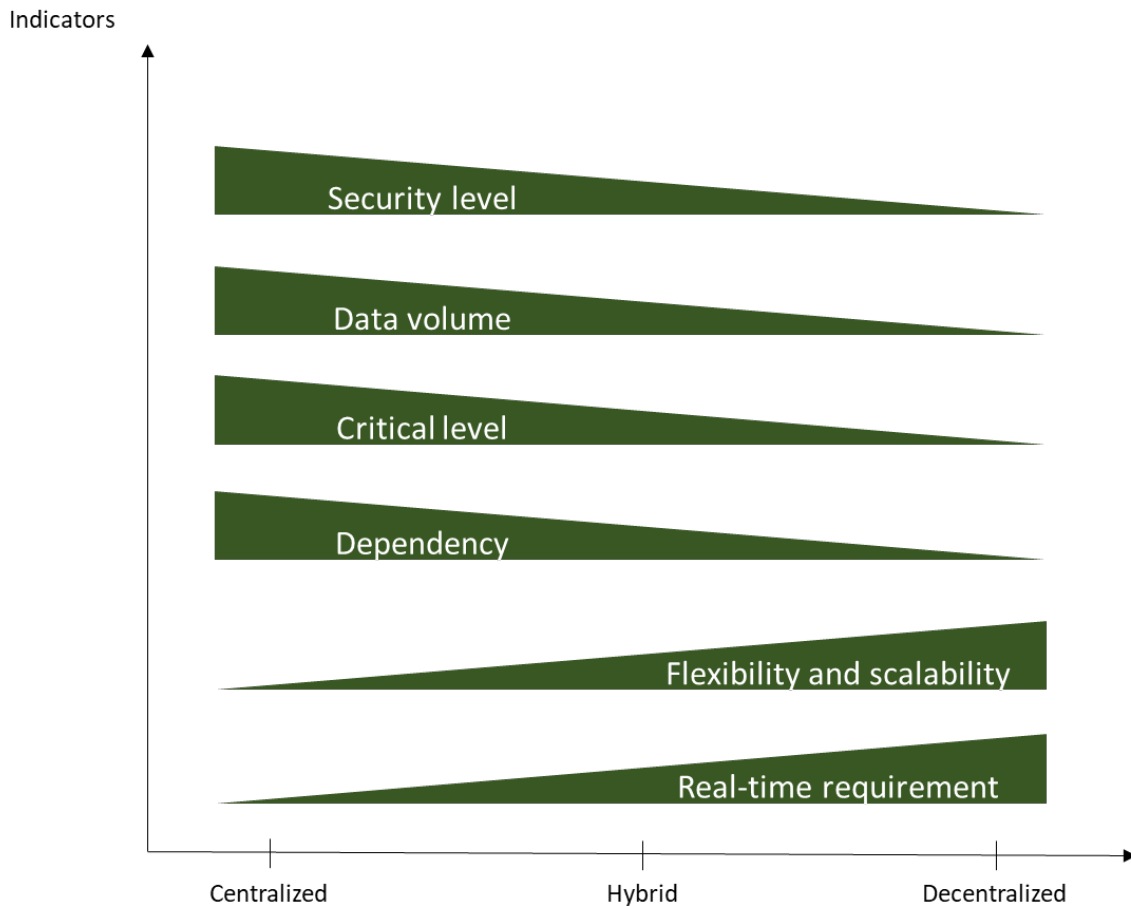


FIGURE 3.6 – The appropriateness of each of the decentralized, centralized, or hybrid approaches according to different indicators

3.6 Conclusion

In this chapter, the proposed framework and its components are explained in detail. In this framework, three main phases were proposed. The first phase examines the needs of the existing system for MM and identifies potential applications and the purpose of its use. In the second phase, the readiness of the existing system and its infrastructure are examined. This phase initially examines the features of the system in general mode and according to the basics related to Industry 4.0. Then, after finding weaknesses and strength points of the system, necessary or recommended modifications could be made as well as deciding about the best-fitted MM. The process of integration and required considerations are mentioned in phase three where different types of integration have been introduced

3.6. CONCLUSION

and their relation with each principle of Industry 4.0 has been discovered. Based on the analysis of all the above, a modular service-oriented architecture has been proposed with adaptive decentralization based on real-time interoperability and virtual capabilities.

Chapitre 4

Experimentation

content

4.1	Introduction to Platform 4.0	116
4.1.1	Control system : MES	116
4.2	Introduction to our mobile manipulator architecture	117
4.2.1	Hardware architecture	117
4.2.2	Software architecture	118
4.3	Case study : Deployment of the proposed framework Integration process of mobile manipulator into the platform 4.0	118
4.3.1	Phase I : Objectives and Applications	119
4.3.2	Phase II : Infrastructure readiness	119
4.3.3	Phase II-II : Infrastructure modification and MM selection	123
4.3.4	Phase III : Integration	123
4.4	Discussion	131

4.1 Introduction to Platform 4.0

In the platform 4.0, a production line provided, equipped with a lathe and milling machine, a laser cut machine, and two Kuka robots, with a vision system to detect and classify the raw parts, and a FARO 3D scanner for quality control connected and integrated, and controlled by MES, which will be explained in the following. Figure 4.1 shows the platform 4.0 after integrating MoMa (see section 4.2) into it.

4.1.1 Control system : MES

The decision-making and scheduling process is assigned to the MES instead of the Programmable Logic Controller (PLC). There are some standard production operations in terms of transferring, machining, quality control, and monitoring. A modular approach is employed to gather the necessary operations in a proper sequence for special functions. For example, if a product needs lathe machining, this module contains two operations as follows. First, pick the part from the initial store, and then drop the part in the lathe machine. For manufacturing a product, several modules need to be applied continuously from the raw part to the final product. These modules are initiated with commands from the MES [152].



FIGURE 4.1 – Platform 4.0

4.2 Introduction to our mobile manipulator architecture

An MM from OMRON has been used and is shown in Figure 4.2. OMRON defines MoMa as a concept, which needs to be discovered in terms of mobility, collaborative robot (cobot) operation, and safety.

4.2.1 Hardware architecture

As shown in Figure 4.2 and explained in Table 4.1, it contains an LD-90 OMRON Mobile robot, and on the top of a mounting table, a TM5 cobot is installed equipped with a built-in vision system and a flexible two-finger gripper. The smart vision system provides the ability to read barcodes and recognize the shape and color and pattern matching. The robot uses a landmark as a reference point so it can better locate objects within the workspace. The system controller, safety controller, and communication with peripherals are integrated into the electrical cabinet. The mobile platform is self-guided and self-charging and utilizes scanning lasers. An OMRON NX 102 PLC is embedded to be the master for the two robots.

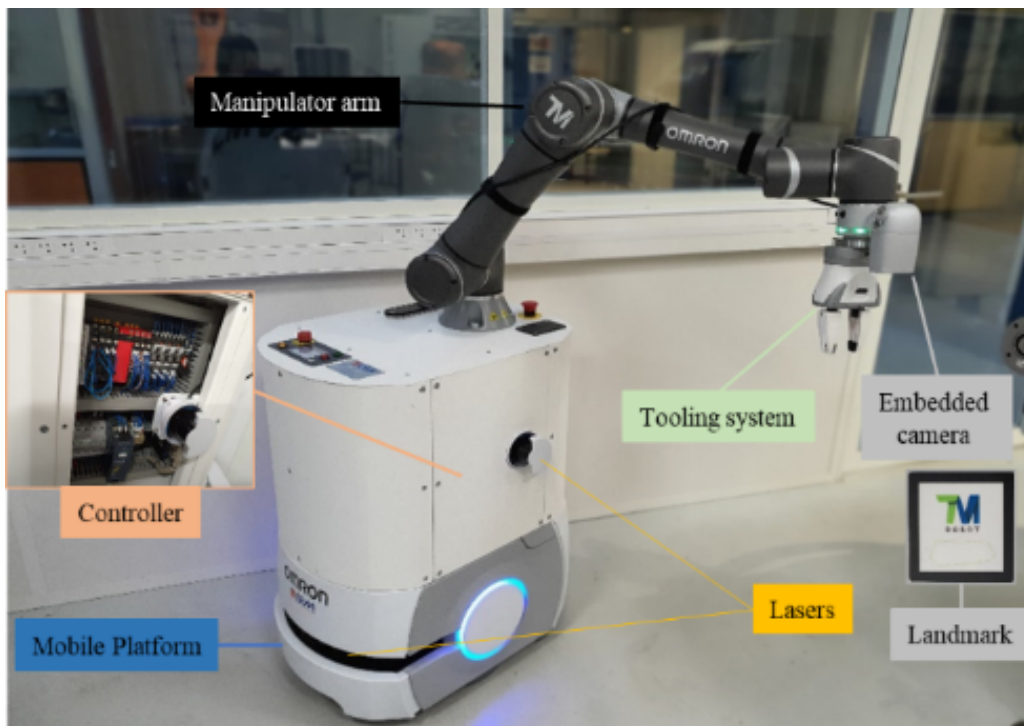


FIGURE 4.2 – OMRON MoMa physical architecture

4.3. CASE STUDY : DEPLOYMENT OF THE PROPOSED FRAMEWORK INTEGRATION PROCESS OF MOBILE MANIPULATOR INTO THE PLATFORM 4.0

TABLE 4.1 – Components Integrated to Form the MoMa Omron

Component	Specification
Mobile Platform	LD-90
Robot Manipulator	TM5M-900
Tooling System	Schunk EGH 80 gripper
Vision System	Integrated vision system 5M pixels, color
PLC	NX 102

4.2.2 Software architecture

The Advanced Robotics Automation Management software (ARAM) runs on the LD Platform core. The operating language for integrating a fleet of autonomous mobile robots with an external automation system is Advanced Robotics Command Language (ARCL). A graphical interface called TMflow exists for the TM robot, which provides a complete interface for logic programming environments. The PLC supports a software called Sysmac studio integrating necessary functions for machine design.

4.3 Case study : Deployment of the proposed framework Integration process of mobile manipulator into the platform 4.0

Conducting a practical experiment in the real world is a confirmation of our proposed framework. In this section, the integration process of an MM from OMRON Company into Platform 4.0 is described, which is a research production system at the Arts et Métiers campus of Paris. As framework suggests starting with a characteristics analysis of the existing production system followed by finding our expectations from an MM that leads us to a proper MM selection. Then, the practical integration is discussed in different layers. Figure 4.3 presents the considerations and challenges for each level of integration.

4.3. CASE STUDY : DEPLOYMENT OF THE PROPOSED FRAMEWORK
 INTEGRATION PROCESS OF MOBILE MANIPULATOR INTO THE PLATFORM
 4.0

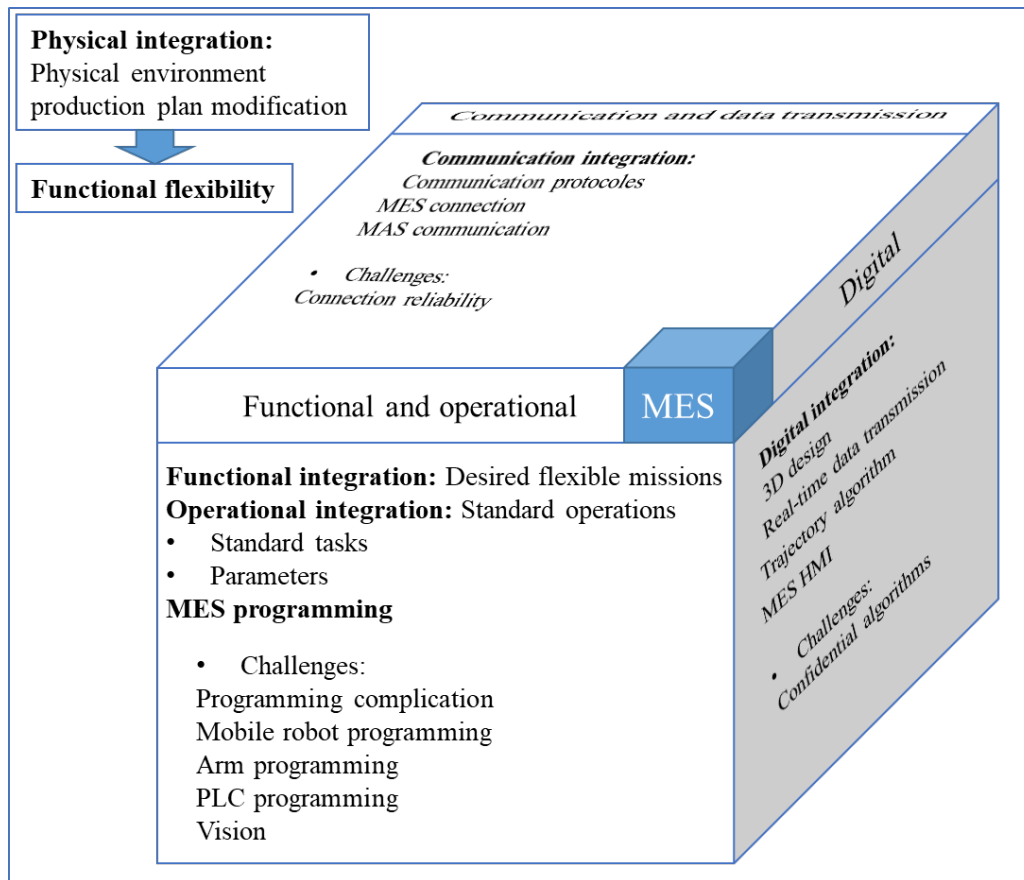


FIGURE 4.3 – Considerations and challenges in each step of experimental integration

4.3.1 Phase I : Objectives and Applications

In the context of Platform 4.0, this case study delves into the "pick and place" operation. The task for the MM is to supply raw materials to the initial station which is near the fixed KUKA robot.

4.3.2 Phase II : Infrastructure readiness

4.3.2.1 Phase II-I : Pre-study

Platform 4.0 was conceptualized and developed with the clear goal of transitioning the traditional 3.0 production system to the more advanced model 4.0. To achieve this, several research axes have been defined. However, it is important to recognize that Platform 4.0, in its current form, is not a pure 4.0 system. It combines elements of both the 3.0 and 4.0 paradigms, making it a hybrid model. This state of transition and evolution is not unique to an organization or department. A significant number

4.3. CASE STUDY : DEPLOYMENT OF THE PROPOSED FRAMEWORK INTEGRATION PROCESS OF MOBILE MANIPULATOR INTO THE PLATFORM 4.0

of companies globally are at a similar stage, trying to align themselves with the Industry 4.0 vision.

Starting with physical assessments, in the first place, there were no recognizable and specific segments in the platform. Layout dimensions and characteristics of the platform were recognized by creating a complete detailed map of the area. A detailed map with the equipment is presented in Figure 4.4 and a map with exact dimensions is shown in Figure 4.5. In this system, the chess game pieces are manufactured. Cylindrical materials serve as the starting point for shaping each unique piece. The diameter of raw materials ranges between 2.5 to 10 centimeters. In the process of creating these chess pieces, a detailed manufacturing plan was set in motion. The beginning of the production line is located near the fixed robot. Within the common workspace shared by the fixed and mobile robots, ten distinct positions have been earmarked. These robots have the capability to determine if these designated positions are occupied or vacant.

The fixed robot initiates the process by transferring the raw material from its initial point to the first available position. Based on the specific requirements of the piece, the mobile robot then relocates the raw component into one of the CNC machines. Some pieces are designed solely on the lathe machine, others exclusively on the milling machine, and there are those that require a precise order of operations on both machines. For pieces that need both machines, the mobile robot retrieves the component from the first machine, positions it in an open spot, and, if the subsequent machine is ready, transfers it there. Upon completion, the mobile robot places the finished items in a communal spot, signaling the fixed robot. The latter then shifts the completed piece to a conveyor system, which in turn routes these products to the accumulation table. In the meantime, the platform is equipped with a 3D scanner that can be used for quality control of parts in different stages of production.

However, there are aspects of the system that are not yet streamlined. The initial stage of placing raw materials was done manually, and there was no mechanism in place to smartly detect when materials were running out. Likewise, finished products either remained on the collection table or were handled manually for further movement. It is noteworthy that there was not a systematic approach to segregate and keep a tally of both raw and finished items. Given the overarching aim of fully transitioning to an Industry 4.0 system, it is imperative that these gaps be addressed while aligning with the principles of Industry 4.0. While this system originated from a conventional automation architecture, it is now evolving into a more complex automation network that has emerged in manufacturing ecosystems with the introduction of the CPS concept. Hence, the current state of the system on the

4.3. CASE STUDY : DEPLOYMENT OF THE PROPOSED FRAMEWORK INTEGRATION PROCESS OF MOBILE MANIPULATOR INTO THE PLATFORM

4.0

platform can be described as a hybrid setup, bridging old and new paradigms in automation technology. The task of identifying robots for part placement operates in a decentralized fashion. Robots communicate amongst themselves to detect whether parts are present or missing in various locations. They also recognize each other's positions within the shared workspace to ensure safety and avoid potential collisions.

To ensure interoperability on the platform, several elements need to be carefully considered. This includes the platform's IT architecture, the communication methods between components, the connectivity infrastructure, the data formats currently in use, and the stability and coverage of the Wi-Fi network. All these factors are crucial in determining the seamless integration and interaction of the system's components. The list of communication protocols compatible with the equipment in the platform includes OPC UA, Ethernet/IP, Profinet, Modbus, etc. Machines, including lathes, milling devices, cutting tools, and robots, directly communicate with the PLC layer. Communication between the machines and the PLC is facilitated using I/O, Profinet, and other industrial communication methods for basic data transfer and automated control. The data exchanged between the machines and the PLC is relayed to the MES via a connection set up between the MES and the PLC using the Siemens Profinet configured in the MES's integration server. The machines have an added layer of IoT components. This includes Intellinova's accelerometer sensors on the lathe, Socomec's power monitoring sensors on their power inputs, and the Sick IoT box that's tied to both position and temperature gauges on the laser cutters. All these IoT devices interface directly with the MES via the Modbus protocol. The FARO 3D Scanner communicates with the MES using the OPC UA protocol. A direct network communication is set up between the MES and the machines to share G code programs.

Different functional modules have been defined in the platform. These modules were defined as separated processes that together could structure an operation. They can be rearranged and orchestrated in various configurations, allowing the production of a diverse range of products. The necessary infrastructures for real-time data transfer exist and are proved in the IoT layer, and also in the DT. A Unity3D-based digital twin has been designed and integrated into the platform. Leveraging simulation tools and technology, 3D representations of robots and machinery were created with KUKASim and then imported into the Unity3D framework. This digital twin operates in observational and simulation mode. At the platform, the MES encompasses multiple service-oriented applications. These include the Aveva System Platform's Integrated Development Environment (IDE), the integration server, the

4.3. CASE STUDY : DEPLOYMENT OF THE PROPOSED FRAMEWORK
 INTEGRATION PROCESS OF MOBILE MANIPULATOR INTO THE PLATFORM
 4.0

HMI constructed via Intouch OMI, and the data historian. Additionally, a DNS server is added to the primary server, facilitating the activation of the Intouch Access Anywhere application.

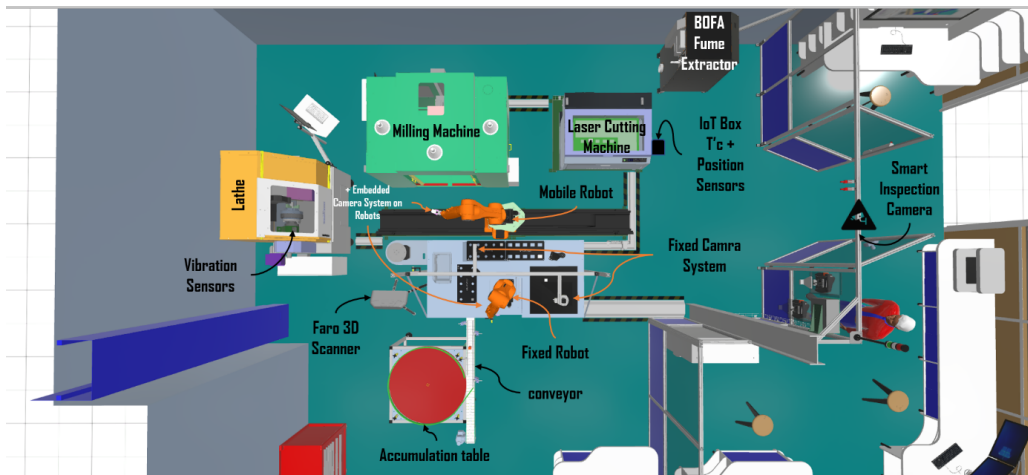


FIGURE 4.4 – Industrial platform 4.0 equipment

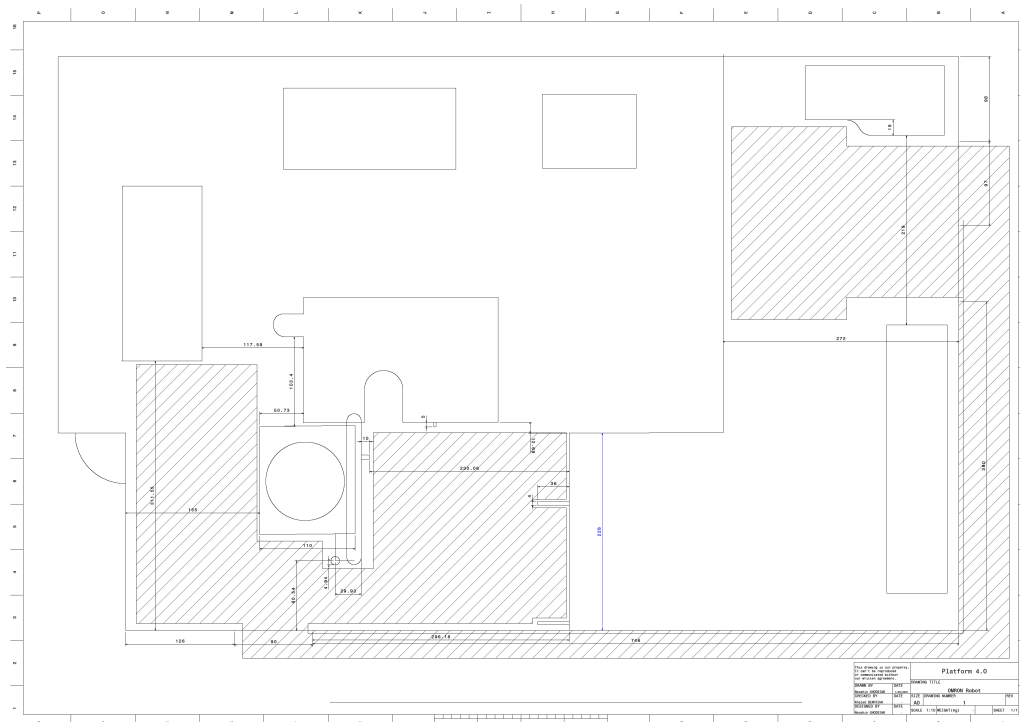


FIGURE 4.5 – Platform 4.0 map with dimensions

4.3.3 Phase II-II : Infrastructure modification and MM selection

Reflecting on the previous phase, characteristics related to the Platform 4.0 have been collected and analyzed. OMRON demonstrated compatibility by providing features that were compatible with previous configurations. As introduced in section 4.2, a unique design of an MM was crafted specifically for the platform 4.0. One of the notable aspects of MoMa is its compact design. This MoMa was designed in such a way that could navigate and operate based on the specific dimensions of the platform. This efficient construction makes it particularly useful for deployment in confined spaces and ensures maximum usability even in areas with limited space.

To facilitate the effortless maneuvering of the MM on the platform, a series of spatial rearrangements were proposed. Initially, there was an urgent need to remove a desk entirely to provide an unobstructed path to MoMa. Additionally, a redesign of the CNC machine layout was necessary for MoMa to efficiently manage Work-In-Progress (WIP) items or load and unload machinery. However, this modification encountered an obstacle because there was a strong desire to keep the configuration of other system components unchanged, especially due to ongoing research guidelines. Also, due to space limitations, major changes were not possible. As a result, several potential applications originally considered for MoMa had to be removed from the planned list. The inventory section did not exist before at the Platform 4.0. An area has been created to serve as raw material storage so that the MoMa would automatically displace raw parts from the storage to the production workstations.

4.3.4 Phase III : Integration

4.3.4.1 Physical Integration

Initiating the movement of the MM necessitates the creation of a comprehensive map of its operational environment. This foundational step is achieved by manually navigating the MM throughout the designated area, enabling it to scan and document every nook and cranny of the space. Once a detailed map of the shop floor is developed, it becomes imperative to pinpoint the specific locations of the workstations within this map. Such precise demarcation ensures the MM has clear reference points and destinations during its operational phase. However, the adaptability and efficiency of the MM are not solely dependent on the accuracy of the map. The unique characteristics of the environment play a critical role in dictating its performance. A plethora of parameters, influenced by environmental condi-

4.3. CASE STUDY : DEPLOYMENT OF THE PROPOSED FRAMEWORK INTEGRATION PROCESS OF MOBILE MANIPULATOR INTO THE PLATFORM 4.0

tions, require meticulous adjustment to optimize the MM's movement. One significant hurdle arises when considering the constraints set by the platform 4.0. Given its dimensions, achieving the MM's top speed becomes a challenging endeavor. Moreover, navigating through tighter pathways demands careful recalibration of the robot's clearance. But this adjustment isn't straightforward.

Tweaking the MM's clearance and free space inherently impacts its safety margins. A reduction in these metrics, while potentially enabling smoother navigation in narrow corridors, can compromise the robot's safety protocols. Balancing these factors becomes paramount—there's a need to strike the perfect equilibrium, where the MM operates at optimal speeds without compromising the safety standards. Furthermore, while the MM possesses the capability to autonomously determine the most efficient path based on its internal algorithms, there is a strategic advantage in guiding its trajectory. By predefining its routes, the probability of the MM encountering unexpected obstacles diminishes significantly. This proactive approach not only ensures smoother operations but further reinforces the MM's safety during its tasks.

4.3.4.2 Communicational Integration

From PLC level to MES level

Variables have been delineated, and primary scripts for a pick-and-place scenario have been formulated. Utilizing the Sysmac studio, the successive workstations to be reached and the operations essential for the collaborative robot can be determined. However, within Platform 4.0, a production plan governed by an MES existed. Consequently, for the seamless assimilation of the MM into the production system, ensuring its control in a congruent manner is imperative. An important step involves identifying the optimal communication protocol, one that is congruous with both the PLC and MES software. In this research, OPC UA has been employed to amalgamate the MoMa with the MES. Post this integration, the PLC variables can be retrieved. Within the MES, both an entity and the attributes of the MoMa OMRON have been demarcated. For the variables that have been extracted, real-time value-monitoring capability is present, in addition to the facility to input a preferred value for each variable. Commands to initiate a pick-and-place operation can be dispatched via the MES, specifying the intended workstation and choosing the correct paths for the TM robot.

A zone is identified as the primary control hub. Within this hub, the central server that operates the supervisory system is located, alongside the main PLC. Every machine and robot in this system

4.3. CASE STUDY : DEPLOYMENT OF THE PROPOSED FRAMEWORK
 INTEGRATION PROCESS OF MOBILE MANIPULATOR INTO THE PLATFORM
 4.0

is already linked to this central PLC, granting them access to the MES. When integrating MoMa into this established production framework, the most streamlined approach was to connect MoMa’s PLC directly to the MES. The IT infrastructure and its capabilities were thoroughly assessed before making this connection. The ideal communication protocol, supported by both the MES and MoMa, was determined to be OPC UA in this context. Given MoMa’s mobile nature, wired connections weren’t feasible for its integration into the primary network. Consequently, wireless connectivity was set up utilizing dual routers, as depicted in Figure 4.6.

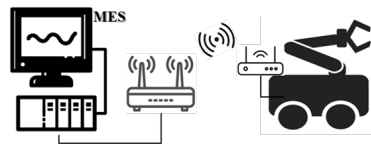


FIGURE 4.6 – Communication and data transmission between MoMa and MES

4.3.4.3 Functional and Operational Integration

Based on the modular service-oriented architecture, different applications of MMs could be defined as services. Each service contains standard operations consisting of standard tasks. Each task has its own parameters, which are possible to define through the MES. For a hypothetical service like transferring raw components from storage to a specified location, the routine procedures and associated tasks with their specifics are illustrated in Figure 4.7 and detailed further in Table 4.2.

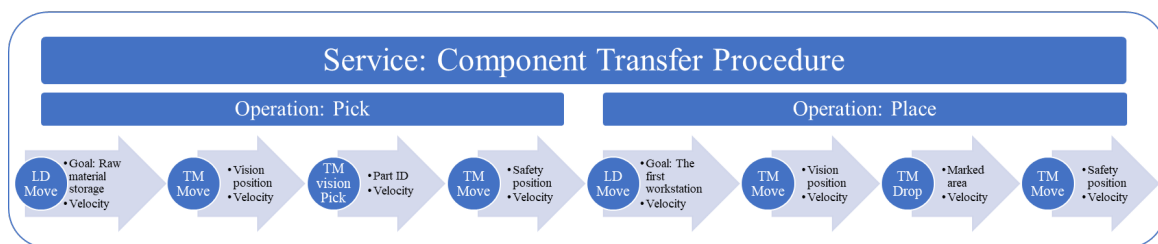


FIGURE 4.7 – Standard tasks, parameters, and operations required to fulfill an example service of pick and place

4.3. CASE STUDY : DEPLOYMENT OF THE PROPOSED FRAMEWORK
 INTEGRATION PROCESS OF MOBILE MANIPULATOR INTO THE PLATFORM
 4.0

TABLE 4.2 – Tasks and Operations of Devices

Device	Service	Operations	Tasks with parameters	Description	Tools
LD	Raw material Transfer Procedure	Pick	LD Move to Goal : Pick_Raw	Sends the mobile platform to the raw material storage	Lasers
TM			TM Move to point : Vision position	TM robot moves to the vision position for activating the camera	Camera
TM			TM Vision Pick the part : Raw material	TM robot picks the raw material from raw material storage	
TM			TM Move to point : Safety position	TM robot moves to a safety position that activates a sensor to allow the LD to move	Safety sensor
LD		Place	LD Move to Goal : Workstation1	Sends the mobile platform to the first workstation	Lasers
TM			TM Move to point : Vision position	TM robot moves to the vision position for activating the camera	Camera
TM			TM Vision Drop in : Marked area	TM robot drops the raw material in a predefined special place detected by camera	
TM			TM Move to point : Safety position	TM robot moves to a safety position that activates a sensor to allow the LD to move	Safety sensor

After receiving a command from MES for activating a pick and place mission with specific parameters, MoMa starts to do the abovementioned operations. Figure 4.8-left shows the vision-guided picking process of raw materials from the raw materials store and dropping it in the desired station is

4.3. CASE STUDY : DEPLOYMENT OF THE PROPOSED FRAMEWORK INTEGRATION PROCESS OF MOBILE MANIPULATOR INTO THE PLATFORM 4.0

shown in Figure 4.8-right.



FIGURE 4.8 – Vision-guided picking operation of raw parts (left) and vision-guided placing operation of raw parts (right)

For specific services of component transfer (pick and place), standard tasks have been determined. For each task parameters should be assigned and MM needs to be programmed. As explained in software architecture, three different software are assigned to each module of MoMa. Even though the PLC acts as the master controller for both the LD and TM, initial programming and infrastructure setup for each is conducted separately. However, this is done with a synchronized perspective. Subsequently, commands to direct both are crafted and implemented within the PLC.

In the physical integration section, the environment map for LD was created. To maintain security, restrictions, and necessary settings were also embedded on the map. Although it is possible to send LD to any point by entering the coordinates of the desired location in MES, this feature is very flexible, but to increase the accuracy, it is recommended to create locations with the name "Goal" on the map. These goals, which can be personalized with the name of the desired place, are recorded as parameters of the tasks. So, for example, the goal named "Pick-Raw" is the most appropriate point for placing MoMa near the raw material storage area. Because MoMa's reproducibility was still appropriate to reach it during high experience and for different starting points. To reach the hypothetical point A, LD could easily reach from B to A, while if he was present at the hypothetical point C, he would have faced a challenge to reach the point A. Also, in general, the repeatability for a position is ± 65 mm, and for the standard target ± 25 mm, $\pm 2^\circ$. Another strength is creating predetermined goals,

4.3. CASE STUDY : DEPLOYMENT OF THE PROPOSED FRAMEWORK INTEGRATION PROCESS OF MOBILE MANIPULATOR INTO THE PLATFORM 4.0

and creating a suitable platform for proper programming of desired movements and points for TM. However, in any case, the LD reaches the target with an accuracy of ± 25 mm, $\pm 2^\circ$, and this is not suitable for sensitive TM tasks that require high accuracy. This is because it is necessary to use visual systems and built-in cameras to perform TM tasks. The primary objective for the mobile robot is to reach the raw materials station. Leveraging its in-built camera vision and distinct landmarks (refer to Figure 4.2), the TM robot is equipped to select the appropriate component. Following this, it returns to a secure zone within the MoMa premises, signaling the mobile robot with a 'wait cancellation' alert. Subsequently, as the mobile robot advances toward its next destination, the TM robot positions the raw component at a predetermined spot. Upon the mobile robot's arrival at the intended workstation, the designated task for the manipulator kicks in. Every movement path (or case) is associated with a specific variable. To orchestrate the entire pick-and-place process, the 'pick-raw' operation is triggered when the mobile robot is at the raw material depot, and the 'place-raw' operation comes into play when it reaches the first workstation. To enhance the manipulator's precision, landmarks are employed by the integrated vision system, aiding the robot's navigation.

The subsequent parameter refers to the component ID. This serves as an instruction for the vision system during the picking process, guiding it on which specific component to identify and subsequently pick. There's the aspect of vision-guided pick-and-place operations. Here, the camera is trained to identify and assist in the precise picking up of objects and placing them accurately based on visual cues. This ensures that items are handled correctly, ensuring smooth operations and minimizing errors. Also, there's the matter of programming the movements of the TM robot. Within TMflow, precise sequences and trajectories are defined for the TM robot. This entails mapping out how the robot should move, adjust, and orient itself in different scenarios and at various predefined goals. Such meticulous programming ensures that the robot operates efficiently, adapts to different environments, and aligns perfectly with the tasks it is set to accomplish. After establishing appropriate routines for each individual device, it becomes essential to undertake PLC programming. This step ensures the sequential and harmonized execution of the programs, aligning the operations of each device to function in a cohesive manner. The code is structured as a case-switch mechanism which depends on the state of the variable Step-Cycle. The code initializes by setting up a unique job identifier for each pick-and-place operation. This helps in tracking each operation distinctly. Once initialized, the AMR is directed towards its initial goal, Pick-Raw, indicating the position where it must pick up raw

4.3. CASE STUDY : DEPLOYMENT OF THE PROPOSED FRAMEWORK INTEGRATION PROCESS OF MOBILE MANIPULATOR INTO THE PLATFORM 4.0

materials. After picking, it is guided to Drop-Raw - the location designated for dropping off these materials.

Safety and synchronization are paramount in such automated environments. Hence, before and after each major task, like picking up or dropping materials, the AMR's status is meticulously checked. Specific statuses like 'WAIT-PICK-RAW' and 'WAIT-DROP-RAW' act as indicators that the AMR is waiting at the respective stations. Only once the AMR reaches a safe position and the conditions are right does the system allow it to proceed. Moreover, to ensure harmonious operation and avoid potential collisions or mishaps, the code monitors certain conditions, possibly via sensors (MOD4-Si04-Logical-Value and MOD4-Si05-Logical-Value). These conditions act as checkpoints, confirming if the way is clear for the robot to proceed. If any unexpected situation arises, the PLC can issue a wait command, ensuring the robot remains stationary until it is safe to move.

Finally, after the AMR completes the designated pick-and-place tasks, the system resets, marking the end of one full operation cycle. This reset ensures that the robot is primed and ready for the next job, maintaining a consistent and repetitive flow of tasks. The PLC code serves as a bridge of communication between the MES and MoMa as well. The OPC UA communication protocol has been chosen for this purpose (see communicational integration). This code as a communication liaison ensures that directives from the MES are received and executed by MoMa, and relay MoMa's operational status back to the MES. Initially, the Step-Cycle parameter is verified. If it is set to its default value of 0, it indicates that MoMa is not engaged in any active task. As such, O-Rob-InCycle is set to FALSE, showcasing that MoMa is idle, and O-Send-CycleCode is activated (TRUE), signifying MoMa's readiness to accept a new task. CycleValue is a variable defined in MES, its value determines the command that MES wants to send to the MoMa. When a service is assigned via the MES, the CycleValue is defined. For instance, setting it to 701 within the MES triggers the service of transferring raw material in MoMa. For security, this variable is defined so that MES could not directly. Once this value is recognized by the PLC (when I-CycleCode-Sent is TRUE and CycleValue isn't zero), the system synchronizes the Step-Cycle with the newly defined CycleValue. This effectively marks the start of the operation in MoMa. O-Rob-InCycle shifts to TRUE, illustrating that MoMa is now operational, and O-Send-CycleCode deactivates (FALSE), indicating MoMa is busy and not awaiting new commands. However, if the MES system later sets the CycleValue back to 0 while O-Rob-InCycle remains TRUE, this signifies the successful receipt and understanding of the MES command by the MoMa. This, in

4.3. CASE STUDY : DEPLOYMENT OF THE PROPOSED FRAMEWORK
 INTEGRATION PROCESS OF MOBILE MANIPULATOR INTO THE PLATFORM
 4.0

turn, prompts the robot to initiate the specific operational cycle linked to the previously sent Cycle-Value. Thus, creating CycleValue effectively prevents MES from directly changing Step-Cycle while MoMa is in another operation or other machines are working dangerously in its working zone. Table 4.3 summarizes the utilized variables and their descriptions.

TABLE 4.3 – Variables and Descriptions

Variable	Description
waiting Raw=true	Vision guided signal that specifies a need of raw material
CycleValue	A value set by the MES to indicate the desired operation or task for MoMa. A value different from 0 indicates an active directive.
Step_Cycle	Reflects the task or operation that MoMa is currently executing or set to execute, based on CycleValue.
O_Rob_InCycle	A binary variable indicating whether MoMa is currently engaged in an operation. TRUE implies MoMa is operational, while FALSE denotes it is available for new tasks.
O_Send_CycleCode	A binary variable to inform the MES of MoMa's readiness. When set to TRUE, it indicates that MoMa is ready to accept new commands.
LCycleCode_Sent	Reflects whether a new task directive (CycleValue) has been received from the MES. (Also, makes sure that the other robots are not working in the same working area.)

4.3.4.4 Digital Integration

It is specified and determined how the physical assets communicate with one another. CPSs, on the other hand, allow for real-time configuration, control, and inspection of the production system. The PLC feeds the MES with the precise coordination of the LD and TM robots. By transferring the value of this coordination in real-time to the digital twin program. The current platform, version 4.0, has a digital twin connected to the manufacturing processes. In addition to integrating with the actual world, the MoMa also did so with the platform's digital doppelganger, as seen in Figure 4.9. This drives us to use a VR headset and handset to control the machine virtually. Additionally, before launching the production, it might be a wonderful simulator to double-check everything.

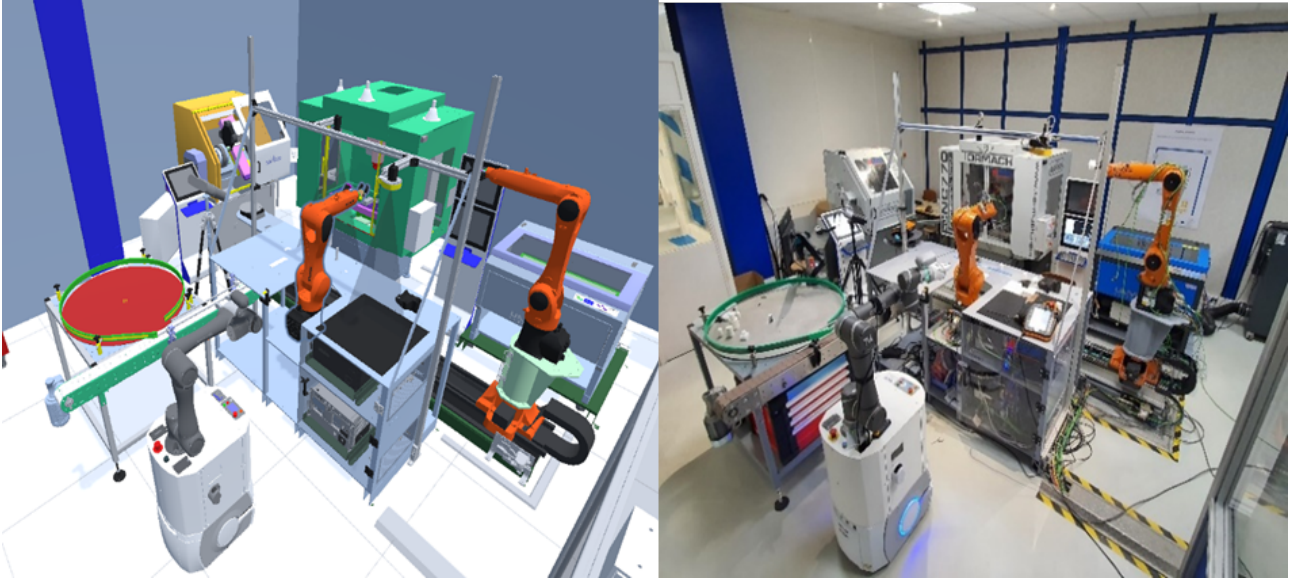


FIGURE 4.9 – MoMa integrated into the digital twin (left) vs platform 4.0 (right).

4.4 Discussion

Effective communication and collaboration between MMs and other components within the production environment are now possible by leveraging the concepts of Industry 4.0 such as CPSs and IoT. This framework encompasses a comprehensive set of considerations to ensure that all important aspects of the production system are taken into account. Furthermore, scheduling is achieved through the standardization of operational and functional integration, in conjunction with the use of MES. MES software plays a vital role in facilitating real-time data exchange, task allocation, and monitoring. The standardized proposed approach, combined with the intelligent use of MES, helps in seamless coordination of tasks and results in optimal scheduling in the production system. This way, MMs are capable of quickly adapting to changing assembly sequences or product variations through the parametrization of each standard task.

The case study places significant emphasis on the optimization of material handling tasks. The deployment of MMs enables autonomous navigation within the production floor, facilitating the retrieval and delivery of components, as well as assisting in assembly operations. This optimization ultimately leads to heightened productivity, enabling human workers to concentrate on higher-value assignments, such as quality control and complex problem-solving endeavors. The final image of integrating MoMa

into the real and virtual production system of platform 4.0 is shown in Figure 45. The proposed framework is the method that has been employed to discover the requirements and solutions offered by MMs. Analyzing the characteristics of the platform 4.0 from different perspectives to finding out its limitations for upgrading the system more and more towards the industry 4.0 principles is the first step. The integration of MoMa is a crucial step towards achieving flexible and adaptable manufacturing processes. This integration requires careful consideration of various technical, organizational, and financial aspects to ensure that the system remains efficient and effective.

One of the key technical challenges is to design the control system in a way that can effectively coordinate the tasks and actions of both mobile and collaborative robots. Additionally, the system must be designed to operate within the constraints of the existing production infrastructure, considering the available power, communication, and safety systems. Setting how to communicate and exchange production orders between MM and MES or other components separately is one of the points addressed by the framework. From the financial perspective, this framework could be used to estimate additional costs associated with acquiring and deploying the robots, as well as the necessary changes to the production system and associated infrastructure. A careful cost–benefit analysis should be conducted to ensure that the investment in MM provides a positive return on investment in the long term.

Our case study is subject to some limitations. Firstly, it should be noted that the scope of our case study is limited to a specific type of production system, and therefore, it may not fully represent the diverse range of functionalities that are assumed for MMs in general. The limited space available for the MoMa to move presented significant challenges for both functional and operational integration. However, at the same time, this problem became a way to investigate and optimize the parameters and settings of the MoMa to move it with the least possible restrictions, which can be improved in future research. Additionally, the study is limited to integrating one MM into the system. However, our framework aims to offer versatility to ensure that it can be effectively applied to a range of real-world industrial settings and positions it well for future expansion and development. In the following, the hypotheses have been stated once again and the way that the framework addresses each of them is discussed :

- A structured integration framework will significantly reduce compatibility issues between MMs and existing production systems, which allow more fluidity and flexibility during the execution of different operations.

The structured integration framework robustly addresses compatibility concerns between MMs and existing production systems. By initially defining MM roles in the "Objectives and Applications" phase, it ensures the new technology aligns with production goals, reducing potential misfits. A clear outline of every MM's role and task ensures streamlined adjustments during updates. During the "Infrastructure Readiness" phase, the pre-study identifies strengths and areas needing enhancement, paving the way for informed infrastructural adjustments and the selection of MMs that resonate with system requirements. By recognizing strengths and potential enhancement areas, the framework ensures that any system changes align seamlessly with the existing infrastructure. The subsequent "Integration Phase" further refines compatibility. Physical and Communicational Integrations ensure that MMs fit well within the production space and can communicate effectively, while Functional and Operational Integrations guarantee they operate in sync with ongoing processes. Lastly, Digital Integration places MMs within Industry 4.0's digital framework, optimizing operation.

A further enrichment of the MSOA is its emphasis on flexibility and scalability. By dividing MMs into distinct hardware and software modules, updates can be made to specific parts without disrupting the entire system. In addition, the service-oriented aspect ensures that MM roles, divided into tasks, are clear, allowing for easier transitions during system changes. The framework also promotes interoperability and creates compatibility modules that act as translators during updates, which is critical to maintaining production flow.

- Addressing key industrial concerns through the proposed framework, such as safety, data protection, interoperability, etc., the adoption rate of MMs in real-world production environments could increase.

Within the initial phase, defining roles and tasks ensures that MMs align with safety protocols and industry standards. This also ensures that the MM does not inadvertently interfere with sensitive operations or exceed predefined boundaries. During the second phase, the assessment pinpoints areas to enhance safety and interoperability, while the MM selection process emphasizes compatibility and safety features. This assessment acts as a preventative measure and ensures that the infrastructure is robust enough to prevent any inadvertent data exposure or operational disruptions by identifying potential areas of vulnerability. As the third phase unfolds, "Physical Integration" ensures that MMs are appropriately situated within the production environment, minimizing the chances of physical mishaps.

4.4. DISCUSSION

”Communicational Integration” specifically addresses interoperability, ensuring MMs can seamlessly communicate with existing systems. In addition, it establishes clear data flow mechanisms, ensuring that sensitive information remains shielded from potential threats. Concurrently, the ”Functional and Operational Integration” ensures that MMs are streamlined with human interfaces, highlighting the need for adequate training and operational safety. By systematically addressing safety, interoperability, and training needs, the framework enhances confidence in MM adoption, thereby likely accelerating their acceptance in production environments. On the other hand, by decomposing MMs into distinct modules - both hardware and software - and precisely defining service-oriented tasks, the framework ensures a seamless and secure integration. For example, adaptation modules in the architecture can act as buffers, translating commands and ensuring that only permitted data flows between the MM and existing systems.

Chapitre 5

Conclusion and perspectives

content

5.1 Perspectives	139
5.1.1 Fleet-sizing problem	139
5.1.2 Task allocation	141
5.1.3 Flexibility evaluation	142

The ability to respond quickly to customer demands and increase productivity without excessive costs is important for manufacturing that is in the context of flexibility, which is an essential feature of smart and competitive factories. Emerging technologies such as cloud operations and industrial Artificial Intelligence in the Industry 4.0 era can facilitate the development of flexible production systems. Robotic systems and mobile robots have been shown a key role in improving the efficiency and autonomy of manufacturing systems. Combining robotic arms' manipulation capabilities with mobile robots' mobility allows for the creation of MMs, which may be employed for a variety of applications to increase the flexibility and effectiveness of the system as a whole. Even though MMs are used in various contexts, in this thesis their industrial applications are reviewed. They are especially well suited for intralogistics tasks like part feeding inside assembly lines and transportation as most of the articles investigated. Inspection, maintenance, or other shopfloor operations such as welding, screwing, painting, and spraying are some of the other applications, which are mentioned in the literature. However, these must be modified to meet the new innovative concepts and demands of the manufacturers, as knowledge progresses.

The developing concept of Industry 4.0 entails combining several technologies, including AI, CPS, cloud computing, IoT, etc., to create smarter factories of the future. Because they provide the production process autonomy and enable it to self-configure, self-supervise, and self-heal, smart factories are essential to Industry 4.0. By enabling devices and services to interact autonomously to fulfill production objectives, CPS is another significant technology used to add autonomy to the production process. IoT is utilized as an integration layer to support autonomous processes for coordination, cooperation, and collaboration, whereas system integration enables cutting-edge technologies to cooperate to boost the manufacturing process's autonomy. Big data analysis and contemporary human-computer interactions are also essential to Industry 4.0 since they address the variety of actors and data, respectively, and enable transparent human integration into the manufacturing process.

Assessing the design and implementation challenges in MM systems revealed that AI has the potential to advance this topic. In general, AI is a branch of cognitive science with active research programs in fields including robotics, machine learning, and image processing. Mobile robots have been enhanced both at the device and system levels by the techniques and knowledge that have been produced. AI techniques have advanced mobile robot navigation to autonomous driving and obstacle avoidance which have been investigated a lot in the literature. However, there is a lack of information

about MMs with the ability to function in cloud settings at the system level, which can offer on-demand computing services and assistance for rational decision-making throughout the scheduling process with MMs. Thus, MM technology has the potential to help industrial processes become more flexible and productive. The use of Autonomous Mobile Robots (AMRs) for interior positioning and navigation has been made possible by recent advancements in AI and computer capacity. AMRs are more flexible and adaptable than conventional AGVs since they function autonomously and with decentralized decision-making, thus, their utilization as the base of MMs is more common, although there are different types of AMRs. As they are more compact and agile, they can integrate into workplaces more effectively. This increases manufacturing flexibility and assists them to fulfill the needs of the current production process. MMs with AMR platforms can operate alongside people as robot coworkers and as an assistive system.

In this regard, one of the main topics of discussion is safety and communication with humans. For example, wearables technologies like AR enable people to interact with MMs in a more intelligent way, increasing collaboration, and coordination among them to enhance production processes, decrease waiting times, and increase safety, and cost efficiency, all of which are important characteristics of Industry 4.0. In general, virtualization and the use of digital models, simulations, and digital twins are essential for MMs. These new improvements enhance the need that MMs to be equipped with cybersecurity systems. The main and fundamental field of achieving all the mentioned features depends on the installation and use of suitable sensors and how to receive data from them, as well as communication with other components to access and exchange information and analyze data instantly.

As a relatively new and growing technology, MMs need more improvements to enter and establish a foothold in production systems on a large scale. But the most important thing to achieve such a goal is extensive experimental tests at the level of real systems that are rarely mentioned. The basic challenges in the few who have mentioned this issue are safety and HRI, communication stability, robustness, communication, and battery. This is why this technology is still in TRL 6 or 7 except for special cases in terms of readiness level. Consequently, it is crucial to concentrate more on the battery and energy issues, as well as the stability and dependability of the technologies utilized on MMs in future research in order to really deploy them. By addressing the challenges of seamlessly integrating MMs into complex production environments, the current research and practical implementation have been linked in this thesis. The proposed framework provides a comprehensive solution that considers

almost all important aspects of existing production systems, allowing for precise decision-making and enhanced operational efficiency.

Upgrading existing manufacturing systems utilizing MMs could be a complex and challenging process. It can be difficult to alter the current configuration for mature production systems when all the components are deeply integrated into a production line. Different components of the production system support a variety of communication protocols depending on how they are configured. For certain older PCs, there are even no communication interfaces available. When the mobile robot notices an obstruction, it pauses and chooses a different path. Thus, a sudden stop in the integrated production plan might have effects on the entire system. However, the concept of CPSs within the framework of Industry 4.0 has introduced distributed architecture that enables vertical, horizontal, and end-to-end integration. This integration facilitates the flow of comprehensive information from the initial point of the supply chain to the final destination, which is the customer. Such integrated systems improve decision-making processes in companies and increase product customization.

The integration framework presented offers a structured methodology encompassing three key stages. Firstly, the "Objectives and Applications" are identified. This essential step precisely defines the expected roles and functions of the MM and ensures that their inclusion seamlessly aligns with broader manufacturing goals while addressing the unique complexities and opportunities of each system. Progressing from this stage, the "Infrastructure Readiness" phase is initiated. Here, a pre-assessment serves as a critical analytical tool and goes deep into the current infrastructure. This detailed assessment highlights strengths and identifies areas for improvement. Based on these findings, the necessary infrastructure settings are suggested that will create a favorable foundation for MM deployment. At the same time, the optimal MM is selected, ensuring its compatibility with the set goals and modified infrastructure. The final stage, the integration phase, deals with a comprehensive integration method. "Physical integration" ensures the physical coordination and work efficiency of robots in the production environment. Subsequently, emphasis is placed on "communication integration", which creates strong data transfer and interaction paths between MM and pre-existing systems. Robots' performance is then aligned with current procedures and human interactions in the aspect of "functional and operational integration". Finally, "digital integration", MM is seamlessly integrated into the digital fabric of Industry 4.0 using advanced tools such as digital twins and real-time data analysis.

5.1 Perspectives

While numerous challenges associated with MMs and their seamless inclusion exist, this thesis couldn't address them all due to constraints in resources and time. Nevertheless, a few of these overlooked aspects will be briefly highlighted in the following.

5.1.1 Fleet-sizing problem

The fleet-sizing problem is a type of optimization problem that involves determining the optimal number of vehicles or other resources to allocate to a fleet in order to meet the demand for a service while minimizing costs. This problem is often encountered in transportation, logistics, and other industries where there is a need to manage a fleet of vehicles or other resources. To solve the fleet-sizing problem, a mathematical model is typically developed that takes into account factors such as demand for the service, the cost of operating the fleet, and other constraints. The model is then solved using optimization algorithms to determine the optimal number of vehicles or resources to allocate to the fleet. There are many different approaches to solving the fleet-sizing problem, and the specific method used will depend on the specific circumstances and constraints of the problem at hand. Some common methods for solving the fleet-sizing problem include linear programming, integer programming, and heuristic algorithms. A mathematical model representative of a real-world fleet-sizing problem that guides us to find the optimal number of MMs for a system is presented below.

Assumptions

As discussed in section 3.3.1.1, three separate operational parts are considered for a manufacturing system : the inventory sector, the shop floor, and the distribution center. The inventory sector is in charge of the storage of raw materials, as well as work-in-progress (WIP), defective parts, and final products. Production operations are considered in the shop floor segment while packaging the final product and getting them ready for distribution is assigned to the distribution department. In each department, special operations have been defined. Additionally, logistic operations are needed between each of the segments. MMs are applied not only for the displacements of material but also to operate some added-value tasks. Let's define a set of tasks for the collaborative robot (K), in this model, having different stations are assumed that are shown using indexes i and j . The MM can move from one station to another. Depending on the distance between station i to station j (d_{ij}), and the average

5.1. PERSPECTIVES

traveling speed of the MM (\bar{v}_{ij}), it is possible to find out the time for traveling between the stations (t_{ij}). For a mobile robot, it is possible to define different zones with special speed limitations. Thus, an average speed is required to improve accuracy. When the mobile robot arrives at a location, the manipulator may have a special task to do. The required time for the arm to finish task k is shown with T_k . P_{ijk} represents the probability that the robot will go from a certain station (i) to another station (j) with the purpose of doing the task k . The number of travels from i to j , doing task k is shown by f_{ijk} . The introduced variables assist us in discovering the total operational time. H is used to show the working hours of the production system while UL shows the capacity of MM number L based on the battery charging process and its lost times.

Notation

- P_{ijk} : The probability of moving from station i to j , doing task k
- F_{ijk} : The number of travels from station i to j , doing task k
- t_{ij} : Time for travelling between station i to j
- d_{ij} : The distance between station i and j
- \bar{v}_{ij} : The average traveling speed from i to j
- T_k : Time for the arm to do the task k
- H : The working hours
- UL : The percentage of MM number L 's usage
- N : Number of MMs

Model

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m P_{ijk} \cdot f_{ijk} \cdot (t_{ij} + T_k)}{H \cdot UL} = \frac{\text{Total operational time}}{\text{Available time of MM } L} \quad (5.1)$$

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{\bar{v}_{ij}} \quad (5.2)$$

5.1.2 Task allocation

In order to produce a customizable automation solution, flexibility should generally be prioritized while designing MM technology. Designing a universal MM that can handle all industrial applications is not practical, though. Having a different MM setup for each operation is also impractical. Hence, to maximize the effectiveness and productivity of the MM system, a balance between flexibility and specialization must be established. However, it is useful to provide a mathematical model to find the number and type of applications that are better to be performed by an MM with a specific setting.

A mathematical model is developed to determine which operations are better to be done by an MM instead of the traditional way that is already implemented in the production system. This model helps to decide based on the operational time. Besides the time of operations, a coefficient is defined to consider the important impact of each operation regarding Industry 4.0 aspects. The assumptions and notations are provided later.

Assumptions

Having one MM in a production system is considered. Instead of a continuous space, some special workstations, docking stations, or inventories have been defined and it is considered that the MM would be always in one of these areas and any required operation should be done in one of these special areas.

Notations

- The stations are shown with index i and j ; $i, j = \{1, 2, \dots, n\}$
- The tasks are indexed by k ; $k = \{1, 2, \dots, K\}$
- d_{ij} : The distance between station i and j ;
- \bar{v}_{ij} : The average travelling speed from i to j ;
- t_{ij} : Time for travelling from i to j ;
- T_k : Time for the arm of the MM to do the task k ;
- T'_k : Time for the traditional system to do the task k without MM;

- P_i : The probability that MM is in station i when it is called for doing operation k in station j ;
- α_k : Industry 4.0 coefficient that means how much the task k is important for having a reliable production system 4.0;

Decision variable :

$$O_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{if the MM does the operation } k \text{ in the station } j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Objective function :

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K O_{kj} \left(T_k + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i t_{ij} \right) + (1 - O_{kj}) T'_k \alpha_k$$

Time calculation :

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{\bar{v}_{ij}}$$

5.1.3 Flexibility evaluation

Evaluating the post-integration flexibility of the system serves as a diagnostic tool to ensure the effect of integrating MMs into the production systems. Using MMs instead of having fixed conveyors or AGVs that are restricted to special lines and areas is expected to enhance the flexibility of material handling. For evaluating this enhancement, a variety of components could be handled by MMs and the time required for switching between part types could be useful measures. In the case of machine flexibility, MMs could be useful in two different scenarios : 1. Considering MM as the machine its tool could be changed due to maintenance or for setting it up for another application. 2. Considering MM as an assistant in replacing other machines' tools. In each case, the required time and effort for the replacement could be measured. Also, especially for case 1, in the long term, the frequency of the need for changing MM's configuration could be measured and evaluated compared to the goals of the system.

Routing flexibility is mostly related to MMs taking the place of other machines or robots in case of failure or maintenance. The added number of possible ways in which a product can be manufactured due to the introduction of MMs to the system is a way to measure this type of flexibility. The time it

5.1. PERSPECTIVES

takes to replace the MM with the original machines, coupled with the difference in operation duration between the original condition and the scenario where the MM performs the task, also aids in this evaluation.

According to [153] the system's volume flexibility is achieved when it remains profitable even at minimal production volumes. This adaptability is heightened when the system incorporates multi-tasking machines, avoids a single-process layout, employs advanced material transport, and possesses routing adaptability to meet varied operational demands seamlessly. MMs are multi-tasking machines specialized for smart material handling that can be expected to enhance this type of flexibility.

5.1. PERSPECTIVES

Bibliographie

- [1] A. Villalonga, G. Beruvides, F. Castano et R. Haber, “Industrial cyber-physical system for condition-based monitoring in manufacturing processes,” 2018, p. 637–642.
- [2] G. Beruvides, C. Juanes, F. Castaño et R. E. Haber, “A self-learning strategy for artificial cognitive control systems.” Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 9 2015, p. 1180–1185.
- [3] M. Safeea, P. Neto et R. Bearee, “On-line collision avoidance for collaborative robot manipulators by adjusting off-line generated paths : An industrial use case,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 119, p. 278–288, 9 2019.
- [4] A. Villalonga, G. Beruvides, F. Castano et R. E. Haber, “Cloud-based industrial cyber-physical system for data-driven reasoning : A review and use case on an industry 4.0 pilot line,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, n^o. 9, p. 5975–5984, 9 2020.
- [5] A. Villalonga, E. Negri, G. Biscardo, F. Castano, R. E. Haber, L. Fumagalli et M. Macchi, “A decision-making framework for dynamic scheduling of cyber-physical production systems based on digital twins,” *Annual Reviews in Control*, vol. 51, p. 357–373, 1 2021.
- [6] M. H. Korayem et H. Ghariblu, “Analysis of wheeled mobile flexible manipulator dynamic motions with maximum load carrying capacities,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 48, n^o. 2-3, p. 63–76, 9 2004.
- [7] M. Hvilshøj, S. Bøgh, O. Skov Nielsen, O. Madsen, O. S. Nielsen et O. Madsen, “Autonomous industrial mobile manipulation (aimm) : past, present and future,” *Industrial Robot : An International Journal*, vol. 39, n^o. 2, p. 120–135, 3 2012, publisher : Emerald Group Publishing Limited.
- [8] N. Ghodsian, K. Benfriha, A. Olabi, V. Gopinath, A. Arnou, C. E. Zant, Q. Charrier et M. E. Helou, “Toward designing an integration architecture for a mobile manipulator in production

BIBLIOGRAPHIE

- systems : Industry 4.0,” *Procedia CIRP*, vol. 109, p. 443–448, 1 2022, publisher : Elsevier.
- [9] N. Ghodsian, K. Benfriha, A. Olabi, V. Gopinath, E. Talhi, L. A. Hof et A. Arnou, “A framework to integrate mobile manipulators as cyber–physical systems into existing production systems in the context of industry 4.0,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 169, p. 104526, 11 2023.
- [10] N. Ghodsian, K. Benfriha, A. Olabi, V. Gopinath et A. Arnou, “Mobile manipulators in industry 4.0 : A review of developments for industrial applications,” *Sensors*, vol. 23, n^o. 19, p. 8026, 1 2023, number : 19 publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [11] K. Schwab, “The fourth industrial revolution - klaus schwab - google books,” 2016, page : 675 container-title : the Fourth Industrial Revolution. [En ligne]. Disponible : https://www.google.fr/books/edition/The_Fourth_Industrial_Revolution/OetrDQAAQBAJ?hl=en&gbpv=1&printsec=frontcover
- [12] T. D. Oesterreich et F. Teuteberg, “Understanding the implications of digitisation and automation in the context of industry 4.0 : A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry,” *Computers in Industry*, vol. 83, p. 121–139, 2016, publisher : Elsevier B.V.
- [13] A. Amaral et P. Peças, “Smes and industry 4.0 : Two case studies of digitalization for a smoother integration,” *Computers in Industry*, vol. 125, 2021.
- [14] T. Komenda, G. Reisinger et A. Wilfried Sihm, “A practical approach of teaching digitalization and safety strategies in cyber-physical production systems,” *Procedia Manufacturing*, vol. 31, p. 296–301, 2019, publisher : Elsevier B.V.
- [15] F. Li, J. Yang, J. Wang, S. Li et L. Zheng, “Integration of digitization trends in learning factories,” *Procedia Manufacturing*, vol. 31, p. 343–348, 2019, publisher : Elsevier B.V.
- [16] J. Böhner, M. Scholz, J. Franke et A. Sauer, “Integrating digitization technologies into resource efficiency driven industrial learning environments,” *Procedia Manufacturing*, vol. 23, n^o. 2017, p. 39–44, 2018, publisher : Elsevier B.V.
- [17] M. Ghobakhloo, “Determinants of information and digital technology implementation for smart manufacturing,” *International Journal of Production Research*, vol. 58, n^o. 8, p. 2384–2405, 2020, publisher : Taylor Francis.
- [18] A. Aerts, M. Reniers et M. R. Mousavi, “Model-based testing of cyber-physical systems,” dans *Cyber-Physical Systems : Foundations, Principles and Applications*. Elsevier Inc., 1 2017, p.

287–304, doi : 10.1016/B978-0-12-803801-7.00019-5.

- [19] S. K. Shukla, “Editorial : Reflections on the history of cyber-physical versus embedded systems,” *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 18, n^o. 3, 6 2019, publisher : Association for Computing Machinery.
- [20] L. Monostori, B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihm et K. Ueda, “Cyber-physical systems in manufacturing,” *CIRP Annals*, vol. 65, n^o. 2, p. 621–641, 2016.
- [21] A. Rodić, I. Stevanović et M. Jovanović, “Smart cyber-physical system to enhance flexibility of production and improve collaborative robot capabilities – mechanical design and control concept,” *Mechanisms and Machine Science*, vol. 67, n^o. January, p. 627–639, 2019, iSBN : 9783030002329.
- [22] N. Jazdi, “Cyber physical systems in the context of industry 4.0,” *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2014*, p. 2–4, 2014, iSBN : 9781479937318.
- [23] J. Wan, M. Chen, F. Xia, D. Li et K. Zhou, “From machine-to-machine communications towards cyber-physical systems,” *Computer Science and Information Systems*, vol. 10, n^o. 3, p. 1105–1128, 2013.
- [24] L. Monostori, “Cyber-physical production systems : Roots, expectations and rd challenges,” *Procedia CIRP*, vol. 17, p. 9–13, 2014, publisher : Elsevier B.V.
- [25] T. Lins et R. A. R. Oliveira, “Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0,” *Computers and Industrial Engineering*, vol. 139, n^o. November 2019, p. 106193, 2020, publisher : Elsevier.
- [26] A. Kuhnle et G. Lanza, “Application of reinforcement learning in production planning and control of cyber physical production systems,” dans *Machine Learning for Cyber Physical Systems*, J. Beyerer, C. Kühnert et O. Niggemann, édit. Springer Berlin Heidelberg, p. 123–132.
- [27] J. Lee, B. Bagheri et H. A. Kao, “A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems,” *Manufacturing Letters*, vol. 3, p. 18–23, 2015, publisher : Society of Manufacturing Engineers (SME).
- [28] D. Romero et F. Vernadat, “Enterprise information systems state of the art : Past, present and future trends,” *Computers in Industry*, vol. 79, p. 3–13, 2016.

BIBLIOGRAPHIE

- [29] A. J. Berre, B. Elvesæter, N. Figay, C. Guglielmina, S. G. Johnsen, D. Karlsen, T. Knothe et S. Lippe, “The athena interoperability framework,” dans *Enterprise Interoperability II*, 2007, p. 569–580, dOI : 10.1007/978-1-84628-858-6_2.
- [30] Others et C. A. W. Group, “C4isr architecture framework version 2.0,” *US Department of Defense*, 1997.
- [31]
- [32] E. Oztemel et E. K. Tekez, “A general framework of a reference model for intelligent integrated manufacturing systems (remims),” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 22, n^o. 6, p. 855–864, 2009, publisher : Elsevier.
- [33] Y. Lu, “Industrial integration : A literature review,” *Journal of Industrial Integration and Management*, vol. 01, n^o. 02, p. 1650007, 2016.
- [34] T. Bangemann, M. Riedl, M. Thron et C. Diedrich, “Integration of classical components into industrial cyber-physical systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, n^o. 5, p. 947–959, 2016.
- [35] D. Chen, G. Doumeings et F. Vernadat, “Architectures for enterprise integration and interoperability : Past, present and future,” *Computers in Industry*, vol. 59, n^o. 7, p. 647–659, 2008.
- [36] Z. Gao, T. Wanyama, I. Singh, A. Gadhri et R. Schmidt, “From industry 4.0 to robotics 4.0 - a conceptual framework for collaborative and intelligent robotic systems,” *Procedia Manufacturing*, vol. 46, n^o. 2019, p. 591–599, 2020.
- [37] K. Windt, F. Böse et T. Philipp, “Autonomy in production logistics : Identification, characterisation and application,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 24, n^o. 4, p. 572–578, 2008.
- [38] R. Galin et R. Meshcheryakov, “Automation and robotics in the context of industry 4.0 : The shift to collaborative robots,” *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, vol. 537, n^o. 3, p. 1–6, 2019.
- [39] J. E. Colgate, J. E. Colgate, J. Edward, M. A. Peshkin et W. Wannasuphoprasit, “Cobots : Robots for collaboration with human operators,” 1996, [Online ; accessed 2021-07-04]. [En ligne]. Disponible : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.37.7236>
- [40] M. Peshkin et J. E. Colgate, “Feature cobots,” *Industrial Robot*, vol. 26, n^o. 5, p. 335–341, 1999.
- [41] F. Ferraguti, A. Pertosa, C. Secchi, C. Fantuzzi et M. Bonfè, “A methodology for comparative analysis of collaborative robots for industry 4.0,” *Proceedings of the 2019 Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition, DATE 2019*, p. 1070–1075, 2019, iSBN : 9783981926323.

- [42] F. Sherwani, M. M. Asad et B. S. Ibrahim, “Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (ir 4.0),” *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies, ICETST 2020*, vol. 0, 2020, iISBN : 9781728171135.
- [43] J. Kildal, M. Martín, I. Ipiña et I. Maurtua, “Empowering assembly workers with cognitive disabilities by working with collaborative robots : A study to capture design requirements,” *Procedia CIRP*, vol. 81, p. 797–802, 2019, publisher : Elsevier B.V.
- [44] A. A. Malik et A. Bilberg, “Framework to implement collaborative robots in manual assembly : A lean automation approach,” *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, p. 1151–1160, 2017, iISBN : 9783902734112.
- [45] S. Bøgh, M. Hvilshøj, M. Kristiansen et O. Madsen, “Autonomous industrial mobile manipulation (aimm) : from research to industry,” 2011, p. 9.
- [46] S. S. Srinivasa, D. Berenson, M. Cakmak, A. Collet, M. R. Dogar, A. D. Dragan, R. A. Knepper, T. Niemueller, K. Strabala, M. Vande Weghe et J. Ziegler, “Herb 2.0 : Lessons learned from developing a mobile manipulator for the home,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, n^o. 8, p. 2410–2428, 2012.
- [47] A. S. Staal, C. G. Salvatierra, D. D. Albertsen, M. Mahendran, R. Ravichandran, R. F. Thomsen, E. B. Hansen et S. Bogh, “Towards a collaborative omnidirectional mobile robot in a smart cyber-physical environment,” *Procedia Manufacturing*, vol. 51, p. 193–200, 2020, publisher : Elsevier B.V.
- [48] Q.-v. Dang, I. E. Nielsen et K. Steger-Jensen, “Scheduling a single mobile robot for feeding tasks in a manufacturing cell,” 2011, page : 1-8 container-title : International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS).
- [49] S. Bøgh, C. Schou, T. Rühr, Y. Kogan, A. Dömel, M. Brucker, C. Eberst, R. Tornese, C. Sprunk, G. D. Tipaldi et T. Hennessy, “Integration and assessment of multiple mobile manipulators in a real-world industrial production facility.” VDE-Verlag, 2014, p. 305–312.
- [50] O. Madsen, S. Bøgh, C. Schou, R. S. Andersen, J. S. Damgaard, M. R. Pedersen et V. Krüger, “Integration of mobile manipulators in an industrial production,” *Industrial Robot*, vol. 42, n^o. 1, p. 11–18, 1 2015, publisher : Emerald Group Publishing Ltd.
- [51] I. Nielsen, Q. V. Dang, G. Bocewicz et Z. Banaszak, “A methodology for implementation of mobile robot in adaptive manufacturing environments,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 28, n^o. 5, p. 1171–1188, 6 2017, publisher : Springer New York LLC.

BIBLIOGRAPHIE

- [52] R. E. Andersen, E. B. Hansen, D. Cerny, S. Madsen, B. Pulendralingam, S. Bøgh et D. Chrysostomou, “Integration of a skill-based collaborative mobile robot in a smart cyber-physical environment,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, n^o. June, p. 114–123, 2017, publisher : The Author(s).
- [53] “Co-manipulation of large parts by dual-arm mobile manipulator - sherlock project,” [Online; accessed 2023-03-30]. [En ligne]. Disponible : https://www.sherlock-test.eu/?page_id=3613#top
- [54] N. Dimitropoulos, G. Michalos et S. Makris, “An outlook on future hybrid assembly systems - the sherlock approach,” vol. 97. Elsevier, 1 2020, p. 441–446, iSSN : 22128271.
- [55] “Assembly of solar thermal collectors - sherlock project,” [Online; accessed 2023-03-30]. [En ligne]. Disponible : https://www.sherlock-test.eu/?page_id=3607
- [56] E. Helms, R. D. Sehraft et M. Hägele, *Rob@work : Robot assistant in industrial environments*, 2002, container-title : Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication DOI : 10.1109/ROMAN.2002.1045655.
- [57] A. De Luca, “Saphari project presentation,” 2012.
- [58] “Colrobot demonstration for the automotive industry.” [En ligne]. Disponible : <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c1dfbaaf&appId=PPGMS>
- [59] “Colrobot prototype in aerospace industry.” [En ligne]. Disponible : <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c13f8bb7&appId=PPGMS>
- [60] ColRobot, “Colrobot - demonstration in space industry,” Rapport technique, 2020, issue : 688807. [En ligne]. Disponible : <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c12064a7&appId=PPGMS>
- [61] “Innovative robotic applications for highly reconfigurable production lines - versatile | versatile project | fact sheet | h2020 | cordis | european commission,” [Online; accessed 2023-03-08]. [En ligne]. Disponible : <https://cordis.europa.eu/project/id/731330>
- [62] A. Cherubini, R. Passama, B. Navarro, M. Sorour, A. Khelloufi, O. Mazhar, S. Tarbouriech, J. Zhu, O. Tempier, A. Crosnier, P. Fraisse et S. Ramdani, “A collaborative robot for the factory of the future : Bazar,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, n^o. 9, p. 3643–3659, 12 2019, publisher : Springer.
- [63] “Isabel,” [Online; accessed 2023-03-29]. [En ligne]. Disponible : <http://www.projekt-isabel.de/?content=aktuelles>

- [64] “Mobile robots for inspection and maintenance activities in extensive industrial plants | mainbot project | fact sheet | fp7 | cordis | european commission,” [Online ; accessed 2023-03-29]. [En ligne]. Disponible : <https://cordis.europa.eu/project/id/285245>
- [65] I. Maurtua, L. Susperregi, A. Fernández, C. Tubío, C. Perez, J. Rodríguez, T. Felsch et M. Ghrissi, “Mainbot - mobile robots for inspection and maintenance in extensive industrial plants,” vol. 49, 2014, p. 1810–1819, iSSN : 18766102.
- [66] H. Engemann, P. Cönen, H. Dawar, S. Du et S. Kallweit, “A robot-assisted large-scale inspection of wind turbine blades in manufacturing using an autonomous mobile manipulator,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, n^o. 19, 2021.
- [67] V. K. A.-G. B. Guy Caverot, Maxime Ezéquel, “Fp7 stamina- sustainable and reliable robotics for part handling in manufacturing automation,” Rapport technique, 2014.
- [68] K. Zhou, U. E. Zimmermann, G. Ebenhofer, C. Eitzinger, U. Zimmermann, N. Oriol, L. P. Castaño, M. A. F. Hernández, C. Walter et J. Saenz, “Mobile manipulator is coming to aerospace manufacturing industry murab project (mri and ultrasound robotic assisted biosy) view project skills view project mobile manipulator is coming to aerospace manufacturing industry.” [En ligne]. Disponible : <https://www.researchgate.net/publication/268500007>
- [69] B. Ubezio, S. Sharma, v. d. G. Meer et M. Taragna, “Kalman filter based sensor fusion for a mobile manipulator,” vol. 5A-2019, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.researchgate.net/publication/335259276>
- [70] J. Saenz, C. Vogel, F. Penzlin et N. Elkmann, “Safeguarding collaborative mobile manipulators - evaluation of the valeri workspace monitoring system,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, p. 47–54, 2017.
- [71] C. Ritter et S. Sharma, “Hand-guidance of a mobile manipulator using online effective mass optimization,” *2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, p. 192–197, 12 2019, iSBN : 978-1-7281-2467-4 publisher : IEEE.
- [72] S. Sharma et C. Scheurer, “Generalized unified closed form inverse kinematics for mobile manipulators with reusable redundancy parameters,” vol. 5B-2017, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://www.researchgate.net/publication/319242554>
- [73] C. Scheurer, M. D. Fiore, S. Sharma et C. Natale, “Industrial implementation of a multi-task redundancy resolution at velocity level for highly redundant mobile manipulators,” 2016, p. 109–117.

BIBLIOGRAPHIE

- [En ligne]. Disponible : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7559105/metrics#metrics>
- [74] J. Saenz, F. Penzlin, C. Vogel et M. Fritzsche, *VALERI - A collaborative mobile manipulator for aerospace production*, 2016, container-title : Advances in Cooperative Robotics : Proceedings of the 19th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2016 DOI : 10.1142/9789813149137_024.
- [75] T. Sandakalum et M. H. Ang, “Motion planning for mobile manipulators—a systematic review,” *Machines*, vol. 10, n^o. 2, 2 2022, publisher : MDPI.
- [76] J. L. Outón, I. Villaverde, H. Herrero, U. Esnaola et B. Sierra, “Innovative mobile manipulator solution for modern flexible manufacturing processes,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, n^o. 24, 12 2019, publisher : MDPI AG PMID : 31835307.
- [77] G. Klančar, A. Zdešar, S. Blažič et I. Škrjanc, “Autonomous guided vehicles,” *Wheeled Mobile Robotics*, p. 387–418, 1 2017, iSBN : 978-0-12-804204-5 publisher : Butterworth-Heinemann.
- [78] A. Montazeri, A. Can et I. H. Imran, “Unmanned aerial systems : Autonomy, cognition, and control,” *Unmanned Aerial Systems : Theoretical Foundation and Applications : A Volume in Advances in Nonlinear Dynamics and Chaos (ANDC)*, p. 47–80, 1 2021, iSBN : 9780128202760 publisher : Elsevier.
- [79] H. Liu, “Introduction,” *Robot Systems for Rail Transit Applications*, p. 1–36, 2020, publisher : Elsevier.
- [80] S. G. Tzafestas, “Mobile robot path, motion, and task planning,” *Introduction to Mobile Robot Control*, p. 429–478, 2014, publisher : Elsevier.
- [81]
- [82] M. Zhao, N. Ansari et E. S. H. Hou, “Mobile manipulator path planning by a genetic algorithm,” *Journal of Robotic Systems*, vol. 11, n^o. 3, p. 143–153, 1994.
- [83] W. S. Yoo, J. D. Kim et S. J. Na, “A study on a mobile platform-manipulator welding system for horizontal fillet joints,” *Mechatronics*, vol. 11, n^o. 7, p. 853–868, 10 2001.
- [84] M. H. Korayem, R. A. Esfeden et S. R. Nekoo, “Path planning algorithm in wheeled mobile manipulators based on motion of arms,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 29, n^o. 4, p. 1753–1763, 4 2015, publisher : Korean Society of Mechanical Engineers.
- [85] F. Burget, M. Bennewitz et W. Burgard, “Bi2rrt : An efficient sampling-based path planning framework for task-constrained mobile manipulation,” *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2016-Novem, p. 3714–3721, 11 2016, iSBN : 9781509037629 publisher : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

- [86] G. Silva, P. Costa, L. Rocha et J. Lima, "Path planning optimization for a mobile manipulator," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2116, n^o. July, p. 1–5, 7 2019, iSBN : 9780735418547 publisher : American Institute of Physics Inc.
- [87] H. J. Wang, X. P. Liu, G. Wang et S. Han, "Optimization of mobile manipulator sorting path based on improved genetic algorithm," *Beijing Youdian Daxue Xuebao/Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, vol. 43, n^o. 5, p. 34–40, 10 2020, publisher : Beijing University of Posts and Telecommunications.
- [88] M. Haddad, S. Hanchi et H. E. Lehtihet, "Point-to-point trajectory planning of wheeled mobile manipulators with stability constraint. extension of the random-profile approach," *European Journal of Mechanics, A/Solids*, vol. 28, n^o. 3, p. 477–493, 5 2009.
- [89] M. H. Korayem, H. N. Rahimi et A. Nikoobin, "Mathematical modeling and trajectory planning of mobile manipulators with flexible links and joints," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 36, n^o. 7, p. 3229–3244, 7 2012.
- [90] G. Pajak et I. Pajak, "Sub-optimal trajectory planning for mobile manipulators," *Robotica*, vol. 33, n^o. 6, p. 1181–1200, 7 2015, publisher : Cambridge University Press.
- [91] M. Gifftthaler, F. Farshidian, T. Sandy, L. Stadelmann et J. Buchli, "Efficient kinematic planning for mobile manipulators with non-holonomic constraints using optimal control," *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3411–3417, 7 2017, iSBN : 9781509046331 publisher : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [92] I. Akli, "Trajectory planning for mobile manipulators including manipulability percentage index," *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, vol. 5, n^o. 4, p. 543–557, 12 2021, iSBN : 4131502100 publisher : Springer Singapore.
- [93] N. Kousi, D. Dimosthenopoulos, A. S. Matthaiakis, G. Michalos et S. Makris, "Ai based combined scheduling and motion planning in flexible robotic assembly lines," vol. 86. Elsevier B.V., 2020, p. 74–79, iSSN : 22128271.
- [94] M. Yang, E. Yang, R. C. Zante, M. Post et X. Liu, *Collaborative mobile industrial manipulator : A review of system architecture and applications*, 2019, container-title : ICAC 2019 - 2019 25th IEEE International Conference on Automation and Computing DOI : 10.23919/ICoNAC.2019.8895183.
- [95] S. Al-Hussaini, S. Thakar, H. Kim, P. Rajendran, B. C. Shah, J. A. Marvel et S. K. Gupta, "Human-supervised semi-autonomous mobile manipulators for safely and efficiently executing machine

BIBLIOGRAPHIE

- tending tasks,” 10 2020. [En ligne]. Disponible : <http://arxiv.org/abs/2010.04899>
- [96] M. Weyrer, M. Brandstötter et M. Husty, “Singularity avoidance control of a non-holonomic mobile manipulator for intuitive hand guidance,” *Robotics 2019, Vol. 8, Page 14*, vol. 8, n^o. 1, p. 14, 2 2019, publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [97] C. Stetco, S. Muhlbacher-Karrer, M. Lucchi, M. Weyrer, L. M. Faller et H. Zangl, “Gesture-based contactless control of mobile manipulators using capacitive sensing,” *I2MTC 2020 - International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings*, 5 2020, iSBN : 9781728144603 publisher : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [98] M. Weyrer, M. Brandstötter et D. Mirkovic, “Intuitive hand guidance of a force-controlled sensitive mobile manipulator,” vol. 66, 2019, p. 361–368, iSSN : 22110992. [En ligne]. Disponible : <https://www.researchgate.net/publication/327348371>
- [99] Z. Zhou, L. Li, R. Wang et X. Zhang, “Experimental eye-in-hand calibration for industrial mobile manipulators,” *2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2020*, p. 582–587, 10 2020, iSBN : 9781728164151 publisher : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [100] G. Andrianakos, N. Dimitropoulos, G. Michalos et S. Makris, “An approach for monitoring the execution of human based assembly operations using machine learning,” vol. 86. Elsevier B.V., 2020, p. 198–203, iSSN : 22128271.
- [101] I. Sarantopoulos, M. Kiatos, Z. Doulgeri et S. Malassiotis, “Split deep q-learning for robust object singulation,” 2020, p. 6225–6231, iSSN : 10504729.
- [102] —, “Total singulation with modular reinforcement learning,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, n^o. 2, p. 4118–4125, 2021.
- [103] I. Kleitsiotis, I. Mariolis, D. Giakoumis, S. Likothanassis et D. Tzovaras, “Anisotropic diffusion-based enhancement of scene segmentation with instance labels,” vol. 13053 LNCS, 2021, p. 383–391, iSSN : 16113349.
- [104] A. Markis, M. Papa, D. Kaselautzke, M. Rathmair, V. Sattinger et M. Brandstötter, “Safety of mobile robot systems in industrial applications,” 2019, p. 26–31.
- [105] “Iso 10218-2 :2011(en), robots and robotic devices — safety requirements for industrial robots — part 2 : Robot systems and integration,” [Online; accessed 2023-03-30]. [En ligne]. Disponible : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10218:-2:ed-1:v1:en>

- [106] S. Bexten, J. Scholle, J. Saenz, C. Walter et N. Elkmann, “Validation of workspace monitoring and human detection for soft safety with collaborative mobile manipulator using machine learning techniques in the colrobot project,” 2018, p. 191–198. [En ligne]. Disponible : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8470596>
- [107] G. Michalos, P. Karagiannis, N. Dimitropoulos, D. Andronas et S. Makris, *Human Robot Collaboration in Industrial Environments*. Cham : Springer International Publishing, 2022, p. 17–39. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1007/978-3-030-78513-0_2
- [108] K. Haninger, *Robot Inference of Human States : Performance and Transparency in Physical Collaboration*. Cham : Springer International Publishing, 2022, p. 55–69. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1007/978-3-030-78513-0_4
- [109] K. Haninger, C. Hegeler et L. Peternel, “Model predictive control with gaussian processes for flexible multi-modal physical human robot interaction.” Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, p. 6948–6955, iSSN : 10504729.
- [110] I. Eimontaite, “Human–robot collaboration using visual cues for communication,” dans *Intelligent Systems, Control and Automation : Science and Engineering*. Springer Science and Business Media B.V., 2022, vol. 81, p. 71–85, doi : 10.1007/978-3-030-78513-0_5 iSSN : 22138994.
- [111] A. Ibarguren, I. Eimontaite, J. L. Outón et S. Fletcher, “Dual arm co-manipulation architecture with enhanced human–robot communication for large part manipulation,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, n°. 21, p. 1–15, 11 2020, publisher : MDPI AG PMID : 33137977.
- [112] I. Eimontaite, C. Jaksic, S. Fletcher, T. Johnson et A.-M. Oostveen, “Will operators work in close proximity to industrial robots? a study of acceptance using psychological and physiological responses,” *SSRN Electronic Journal*, 10 2020, publisher : Elsevier BV.
- [113] N. Dimitropoulos, T. Toghias, N. Zacharaki, G. Michalos et S. Makris, “Seamless human–robot collaborative assembly using artificial intelligence and wearable devices,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, n°. 12, p. 5699, 6 2021, publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [114] N. Dimitropoulos, T. Toghias, G. Michalos et S. Makris, “Operator support in human-robot collaborative environments using ai enhanced wearable devices,” vol. 97. Elsevier, 1 2020, p. 464–469, iSSN : 22128271.
- [115] A. K. Ramasubramanian, R. Mathew, I. Preet et N. Papakostas, “Review and application of edge ai solutions for mobile collaborative robotic platforms,” vol. 107. Elsevier B.V., 2022, p. 1083–1088,

iSSN : 22128271.

- [116] A. K. Ramasubramanian, S. M. Aiman et N. Papakostas, “On using human activity recognition sensors to improve the performance of collaborative mobile manipulators : Review and outlook,” vol. 97. Elsevier, 1 2020, p. 211–216, iSSN : 22128271.
- [117] K. Haninger, M. Radke, A. Vick et J. Kruger, “Towards high-payload admittance control for manual guidance with environmental contact,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, n^o. 2, p. 4275–4282, 4 2022, publisher : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [118] G. Evangelou, N. Dimitropoulos, G. Michalos et S. Makris, “An approach for task and action planning in human-robot collaborative cells using ai,” vol. 97. Elsevier, 1 2020, p. 476–481, iSSN : 22128271.
- [119] A. K. Ramasubramanian et N. Papakostas, “Operator - mobile robot collaboration for synchronized part movement,” vol. 97. Elsevier, 1 2020, p. 217–223, iSSN : 22128271.
- [120] A. K. Ramasubramanian, R. Mathew, M. Kelly, V. Hargaden et N. Papakostas, “Digital twin for human-robot collaboration in manufacturing : Review and outlook,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, n^o. 10, p. 4811, 5 2022, publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [121] C. Frese, A. Zube et C. Frey, “Workspace monitoring and planning for safe mobile manipulation,” 6 2020. [En ligne]. Disponible : <http://arxiv.org/abs/2006.01546>
- [122] “Saphari - safe and autonomous physical human-aware robot interaction - results,” [Online ; accessed 2023-03-29]. [En ligne]. Disponible : http://www.saphari.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=189&Itemid=125
- [123] E. Lamon, F. Fusaro, P. Balatti, W. Kim et A. Ajoudani, “A visuo-haptic guidance interface for mobile collaborative robotic assistant (moca),” *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 11 253–11 260, 2020, iISBN : 9781728162126.
- [124] M. Leonori, J. M. Gandarias et A. Ajoudani, “Moca-s : A sensitive mobile collaborative robotic assistant exploiting low-cost capacitive tactile cover and whole-body control,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, n^o. 3, p. 7920–7927, 2022, arXiv : 2202.13401.
- [125] N. Kousi, G. Michalos, S. Aivaliotis et S. Makris, “An outlook on future assembly systems introducing robotic mobile dual arm workers,” *Procedia CIRP*, vol. 72, p. 33–38, 2018, publisher : Elsevier B.V.
- [126] C. Gkournelos, P. Karagiannis, N. Kousi, G. Michalos, S. Koukas et S. Makris, “Application of wearable devices for supporting operators in human-robot cooperative assembly tasks,” vol. 76. Elsevier B.V., 2018, p. 177–182, iSSN : 22128271.

BIBLIOGRAPHIE

- [127] N. Kousi, C. Stoubos, C. Gkournelos, G. Michalos et S. Makris, “Enabling human robot interaction in flexible robotic assembly lines : An augmented reality based software suite,” vol. 81. Elsevier B.V., 2019, p. 1429–1434, iSSN : 22128271.
- [128] K. Lotsaris, C. Gkournelos, N. Fousekis, N. Kousi et S. Makris, “Ar based robot programming using teaching by demonstration techniques,” vol. 97. Elsevier B.V., 2020, p. 459–463, iSSN : 22128271.
- [129]
- [130] N. Kousi, C. Gkournelos, S. Aivaliotis, C. Giannoulis, G. Michalos et S. Makris, “Digital twin for adaptation of robots’ behavior in flexible robotic assembly lines,” vol. 28. Elsevier B.V., 2019, p. 121–126, iSSN : 23519789.
- [131] N. Kousi, C. Gkournelos, S. Aivaliotis, K. Lotsaris, A. C. Bavelos, P. Baris, G. Michalos et S. Makris, “Digital twin for designing and reconfiguring human–robot collaborative assembly lines,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, n^o. 10, p. 4620, 5 2021, publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [132] J. L. Outón, I. Merino, I. Villaverde, A. Ibarguren, H. Herrero, P. Daelman et B. Sierra, “A real application of an autonomous industrial mobile manipulator within industrial context,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 10, n^o. 11, 2021.
- [133] H. Engemann, S. Du, S. Kallweit, P. Cönen et H. Dawar, “Omnivil—an autonomous mobile manipulator for flexible production,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, n^o. 24, p. 1–30, 2020, PMID : 33348813.
- [134] B. Dieber et B. Breiling, “Security considerations in modular mobile manipulation.” Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 3 2019, p. 70–77.
- [135] J. P. Shewchuk et C. L. Moodie, “Definition and classification of manufacturing flexibility types and measures,” *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 10, p. 325–349, 1998, publisher : Springer.
- [136] M. I. M. Wahab, D. Wu et C.-G. Lee, “A generic approach to measuring the machine flexibility of manufacturing systems,” *European Journal of Operational Research*, vol. 186, n^o. 1, p. 137–149, 4 2008.
- [137] A.-Y. Chang, “On the measurement of routing flexibility : A multiple attribute approach,” *International Journal of Production Economics*, vol. 109, n^o. 1, p. 122–136, 9 2007.
- [138] E. P. Jack et A. Raturi, “Sources of volume flexibility and their impact on performance,” *Journal of Operations Management*, vol. 20, n^o. 5, p. 519–548, 9 2002.

- [139] J. Connelly, W. S. Hong, R. B. Mahoney Jr et D. A. Sparrow, “Current challenges in autonomous vehicle development,” vol. 6230. SPIE, 2006, p. 115–125.
- [140] E. A. Lee et S. A. Seshia, *Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach*, 2015, [Online; accessed 2022-07-04]. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.fr/books?hl=en&lr=&id=chPiDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Lee+EA,+Seshia+SA.++Introduction+to+Embedded+Systems,+A+Cyber-Physical+Systems+Approach,+2nd+ed.,+E.A.+Lee+and+S.+A.+Seshia,+Berkley,+USA.&ots=wXyJt2IDFP&sig=M7nPCIoIzG-UjVctj2W7yw1B>
- [141] L. Kaven, J. Rachner, T. Schmid, A. Göppert et R. H. Schmitt, “Reactive online scheduling of mobile resources for adaptive layout evolution in line-less assembly system,” *Procedia CIRP*, vol. 107, p. 270–275, 1 2022.
- [142] J. C. Bendul et H. Blunck, “The design space of production planning and control for industry 4.0,” *Computers in Industry*, vol. 105, p. 260–272, 2 2019.
- [143] G. K. Saharidis, Y. Dallery et F. Karaesmen, “Centralized *VERSUS* decentralized production planning,” *RAIRO - Operations Research*, vol. 40, n^o. 2, p. 113–128, 4 2006.
- [144] O. Antons et J. C. Arlinghaus, “Designing decision-making authorities for smart factories,” *Procedia CIRP*, vol. 93, p. 316–322, 1 2020.
- [145] N. Al-Falahy et O. Y. Alani, “Technologies for 5g networks : Challenges and opportunities,” *It Professional*, vol. 19, n^o. 1, p. 12–20, 2017, publisher : IEEE.
- [146] M. Khadmaoui-Bichouna, J. M. Alcaraz-Calero et Q. Wang, “Empirical evaluation of 5g and wi-fi mesh interworking for integrated access and backhaul networking paradigm,” *Computer Communications*, vol. 209, p. 429–443, 9 2023.
- [147] M. S. Essers et T. H. J. Vaneker, “Design of a decentralized modular architecture for flexible and extensible production systems,” *Mechatronics*, vol. 34, p. 160–169, 3 2016.
- [148]
- [149] W. Hofmann, J. H. Ulrich, S. Lang, T. Reggelin et J. Tolujew, “Simulation and virtual commissioning of modules for a plug-and-play conveying system,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, n^o. 11, p. 649–654, 1 2018.
- [150] K. L. Keung, C. K. M. Lee, L. Xia, C. Liu, B. Liu et P. Ji, “A cyber-physical robotic mobile fulfillment system in smart manufacturing : The simulation aspect,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 83, p. 102578, 10 2023.

- [151] L. Dhirani et T. Newe, “Hybrid cloud slas for industry 4.0 : Bridging the gap,” *Annals of Emerging Technologies in Computing*, vol. 4, p. 41–60, 12 2020.
- [152] C. El Zant, K. Benfriha, S. Loubère, A. Aoussat et O. Adjoul, “A design methodology for modular processes orchestration,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 35, p. 106–117, 11 2021.
- [153] J. Browne, D. Dubois, K. Rathmill, S. P. Sethi et K. E. Stecke, “Classification of flexible manufacturing systems,” *The FMS magazine*, vol. 2, n° 2, p. 114–117, 1984.

BIBLIOGRAPHIE

Annexe A

List of publications

- **Ghodsian, N.**, Benfriha, K., Olabi, A., Gopinath, V., Talhi, E., Hof, L. A., & Arnou, A. (2023). A framework to integrate mobile manipulators as cyber–physical systems into existing production systems in the context of industry 4.0. *Robotics and Autonomous Systems*, 169, 104526.
- **Ghodsian, N.**, Benfriha, K., Olabi, A., Gopinath, V., & Arnou, A. (2023). Mobile Manipulators in Industry 4.0 : A Review of Developments for Industrial Applications. *Sensors*, 23(19), 8026.
- **Ghodsian, N.**, Benfriha, K., Olabi, A., Gopinath, V., Arnou, A., & Charrier, Q. (2022). Toward designing an integration architecture for a mobile manipulator in production systems : Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 109, 443-448.

Annexe B

Thèse en français

B.1 Introduction

Nous vivons dans un monde de plus en plus numérisé et la manière de fabriquer les produits a changé. L'industrie manufacturière traditionnelle dans le monde a été grandement affectée par la transformation numérique. Cette évolution a rendu omniprésentes des technologies émergentes telles que les robots intelligents, les drones autonomes, les capteurs et l'impression 3D. La vitesse de ces changements continue d'augmenter, et les entreprises ainsi que leurs processus industriels doivent être accompagnés pour l'intégration réussie des nouvelles technologies. Dans l'Industrie 3.0, les ordinateurs sont entrés en jeu, mais dans l'Industrie 4.0, les ordinateurs sont connectés et l'intelligence embarquée apportera agilité et autonomie aux décisions. La combinaison des Systèmes Cyber-Physiques (CPS), de l'Internet des Objets (IoT) et de la fabrication en nuage rendront les usines intelligentes une réalité [1]. Pour les entreprises, l'objectif principal du passage à l'Industrie 4.0 est de poursuivre la performance en ligne avec les nouvelles demandes sociétales. Pour cela, elles doivent créer un écosystème connecté doté de capacités cognitives améliorées pour optimiser et contrôler les systèmes de fabrication [2]. Cet écosystème est basé sur de nombreux facteurs. Des facteurs technologiques tels que l'apprentissage automatique, la robotique avancée, l'IoT industriel et d'autres nouvelles technologies [3]. Le facteur stratégique suggère que les entreprises doivent améliorer leur infrastructure pour rester compétitives et également changer leurs modèles commerciaux et inclure également des modèles basés sur les données [4]. Le dernier facteur, mais non le moindre, est de développer des compétences qui seront nécessaires pour la durabilité d'une industrie ultra-connectée. L'Industrie 4.0 est également reconnue comme un facteur décisif dans l'amélioration de la flexibilité de production, ce qui augmente la capacité d'une

B.1. INTRODUCTION

entreprise à répondre immédiatement aux demandes des consommateurs et à renforcer l'efficacité du système de fabrication sans engager de dépenses supplémentaires ou utiliser d'importantes quantités de ressources [5]. Après les robots collaboratifs (cobots) et les robots mobiles collaboratifs, les systèmes constitués d'un bras robotique à bord d'un robot mobile sont la prochaine étape pour aider à améliorer la performance, en particulier en augmentant la flexibilité [6]. Ces systèmes sont généralement appelés Manipulateurs Mobiles Autonomes (MMs) capables de réaliser une variété de tâches, y compris la logistique, le pick and place, et la manipulation [7]. L'architecture classique d'un MM comprend un système de plateforme mobile, un système de manipulateur robotique, un système d'outillage et un système de vision, comme le montre la Figure B.1.

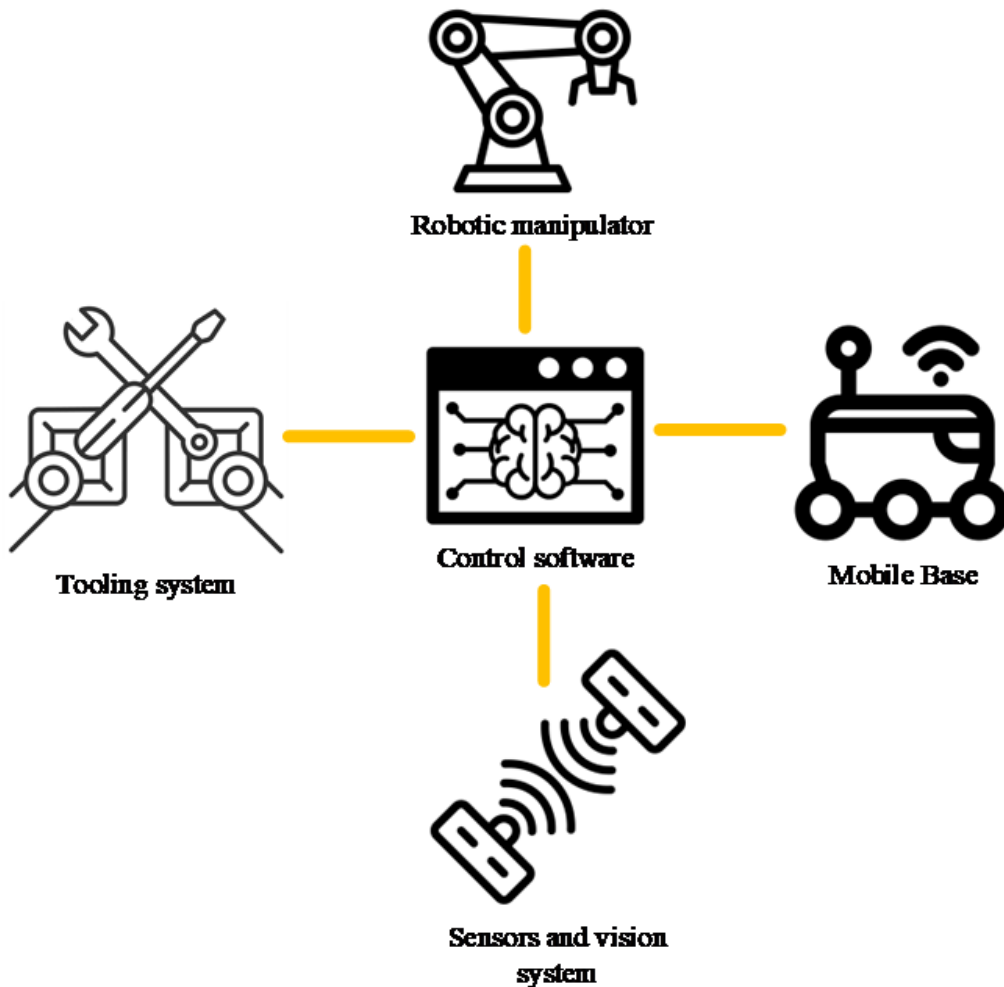


FIGURE B.1 – Architecture classique d'un manipulateur mobile

Avec la combinaison de différents types de robots mobiles, de bras robotiques, de systèmes de vision et d'outillage, plusieurs types et conceptions de MMs peuvent être réalisés. Par exemple, choisir entre des Véhicules Guidés Automatisés (AGV) - qui sont attachés à des pistes ou des câbles au sol, ou utilisent des signaux radio, des caméras d'imagerie, des aimants ou des lasers pour guider la navigation, - ou des Robots Mobiles Autonomes (AMR) - qui peuvent naviguer automatiquement - pour la base mobile. Ou le choix entre des robots industriels traditionnels ou des robots collaboratifs attachés à différents types d'outils comme effecteurs finaux peut fournir différentes applications. Une introduction détaillée aux différents types de robots est fournie dans la section 2.2.1. En conséquence, les systèmes robotiques autonomes ont le potentiel d'améliorer la flexibilité des environnements de fabrication existants. De plus, les nouvelles fonctionnalités offertes par les MMs et leur capacité à se déplacer dans un processus de production industrielle ont suscité un grand intérêt. Par conséquent, il y a une augmentation de la demande pour les MMs mais leur intégration dans le processus de fabrication est loin d'être évidente [8]. Pour les entreprises qui souhaitent bénéficier des MMs, une feuille de route complète et un cadre sont nécessaires pour intégrer un dispositif hautement avancé. Surtout, lorsqu'un système de production existe avec de l'équipement ancien et conventionnel. L'intégration d'un nouveau CPS, comme MM, n'est pas seulement une simple connexion entre les dispositifs physiques mais une communication efficace entre les composants de l'atelier et les systèmes de contrôle tels que les Systèmes d'Exécution de la Fabrication (MES). Cela signifie traiter les données traitées et les informations échangées, ainsi qu'aligner les processus commerciaux.

Comme mentionné précédemment, l'intégration de MM est complexe car son système de contrôle n'est souvent pas compatible avec les caractéristiques opérationnelles attendues, surtout si un contrôle intelligent entre MM et MES est attendu. Ce contrôle intelligent permet de superviser l'ensemble du processus en temps réel, ce qui permet de répondre rapidement aux changements. De plus, de nombreux industriels ignorent les limitations actuelles de ce type de CPS. Ainsi, nos résultats de recherche, exprimés sous forme de contribution méthodologique, pourraient être utilisés par les décideurs industriels pour les guider à travers différentes étapes concernant l'installation d'un MM du point de vue fonctionnel, technologique et organisationnel.

B.2 Description du problème

Dans le paysage en évolution de l'Industrie 4.0, l'intégration des MMs en tant que CPS dans les systèmes de fabrication existants présente des défis significatifs. Bien que les MMs aient le potentiel de révolutionner les chaînes de production en offrant une plus grande flexibilité, adaptabilité et efficacité, les industries font souvent face à des obstacles à l'intégration transparente de ces systèmes en raison de diverses préoccupations opérationnelles, d'infrastructure et de communication. De plus, il existe un écart important entre les développements prometteurs dans les MMs et leur adoption réelle dans les environnements de production réels. Une approche systématique pour guider cette intégration, qui aborde les avantages et préoccupations potentiels, fait actuellement défaut. Développer un tel cadre est dans le contexte de cette thèse.

B.2.1 Aspect économique

Les conséquences économiques d'intégrations technologiques faibles sont significatives. Il ne s'agit pas seulement des coûts d'investissement initiaux, mais aussi des revenus potentiels perdus en raison de dysfonctionnements, d'inefficacités ou d'échecs de mise en œuvre. Ce dernier peut parfois être bien plus élevé que les coûts initiaux. De plus, corriger les erreurs après la mise en œuvre peut être encore plus coûteux. En outre, des coûts indirects peuvent s'ajouter, tels que des pénalités contractuelles ou la perte de confiance des clients due à des retards ou des promesses non tenues. En outre, lorsque les ressources sont liées à une intégration inefficace ou échouée, cela peut ralentir l'élan d'investissement et soulever des doutes sur les choix stratégiques effectués.

B.2.2 Complexité de l'intégration

Pour plusieurs raisons, cette intégration peut être compliquée. Des objectifs non définis sont l'un des aspects difficiles qui peuvent compromettre une intégration réussie. L'infrastructure existante n'est pas toujours compatible avec les nouvelles technologies. Sans une évaluation claire et des changements possibles, l'intégration peut rencontrer des problèmes opérationnels. Assurer une communication efficace entre la nouvelle technologie (les MMs, dans ce cas) et les systèmes existants est critique. En effet, les nouvelles technologies peuvent parfois perturber les opérations existantes si elles ne sont pas correctement synchronisées, il est crucial de s'assurer qu'elles sont intégrées dans l'architecture numérique

plus large. Sans cela, les entreprises pourraient ne pas tirer pleinement parti des outils numériques avancés. Avec l'augmentation de la numérisation et de la connectivité, se pose le défi de gérer efficacement de vastes quantités de données et d'assurer leur sécurité. À mesure que les industries adoptent des technologies plus avancées, il devient essentiel de s'assurer que ces systèmes peuvent fonctionner de manière transparente aux côtés des opérateurs humains sans compromettre la sécurité. De plus, comme les technologies évoluent continuellement, il peut y avoir des préoccupations quant à savoir si une intégration réalisée aujourd'hui sera toujours valide ou efficace à l'avenir. Un cadre standard assure la cohérence et le respect des meilleures pratiques. Le problème fondamental est donc : ■ **Comment les industries peuvent-elles intégrer efficacement les MMs en tant que CPS dans leurs systèmes de fabrication existants, en garantissant la faisabilité économique, la compatibilité opérationnelle, une communication efficace et une gestion sécurisée des données tout en maximisant les avantages de la flexibilité, de l'adaptabilité et du contrôle intelligent ?** ■

Cela nous amène aux questions de recherche :

- Quels sont les besoins et préoccupations clés des industries associés à l'intégration des MMs dans les systèmes de production existants ?
- Comment un cadre structuré peut-il répondre aux hésitations des industries concernant les MMs ?
- De quelles manières le cadre proposé peut-il améliorer la flexibilité de la production, fournir une plus grande fluidité dans la planification des opérations et n'avoir aucun impact sur les opérations sensibles une fois les MMs intégrés ?
- Comment le cadre proposé peut-il être validé et affiné pour garantir son efficacité dans un environnement de production réel ?

B.3 Hypothèse

Sur la base de la description du problème exposée, il est devenu évident qu'un cadre spécialisé est impératif pour l'intégration transparente des MMs, abordant les appréhensions prévalentes de l'industrie concernant leur déploiement étendu. Dans cette section, des hypothèses sont formulées qui sont ancrées dans les défis et préoccupations industriels, soulignant nos suppositions que le cadre proposé peut offrir des solutions viables.

- Un cadre d'intégration structuré réduira considérablement les problèmes de compatibilité entre les MMs et les systèmes de production existants, permettant plus de fluidité et de flexibilité lors de l'exécution de différentes opérations.
- En abordant les préoccupations industrielles clés à travers le cadre proposé, telles que la sécurité, la protection des données, l'interopérabilité, etc., le taux d'adoption des MMs dans les environnements de production réels pourrait augmenter.

B.4 Contribution

La contribution de notre travail de recherche est de proposer une nouvelle méthodologie pour faciliter l'intégration de MM dans un processus industriel existant. Il est déjà vu que les technologies MM sont à la fois recherchées et redoutées. Recherchées, car elles contribuent à la numérisation des lignes de production grâce à de nouvelles fonctionnalités telles que l'autonomie et la flexibilité. Redoutées, car leur adoption peut générer plusieurs risques, notamment en raison de la complexité technologique, des coûts d'investissement, des compétences requises pour les rendre efficaces et des aspects de maintenance. Cette approche est basée sur une vision globale du système de production en examinant les complexités depuis les opérations très concrètes de l'atelier jusqu'aux zones de prise de décision plus abstraites de la couche de gestion et des systèmes de contrôle. Bien qu'il y ait des recherches considérables sur les MMs, il existe un écart en ce qui concerne leur mise en œuvre pratique dans les industries. Ce cadre pourrait combler cet écart en se concentrant sur le déploiement et l'utilisation réels des MMs dans des scénarios du monde réel.

B.5 Méthodologie de recherche

Cette étude a été formée avec une méthode à multiples facettes. En passant en revue la littérature connexe, des essais et erreurs lors d'expériences itératives en laboratoire, en créant un cadre de base, et en le développant et en l'améliorant à l'aide d'expériences lors de différentes expériences. La Figure B.2 illustre la méthodologie de recherche.

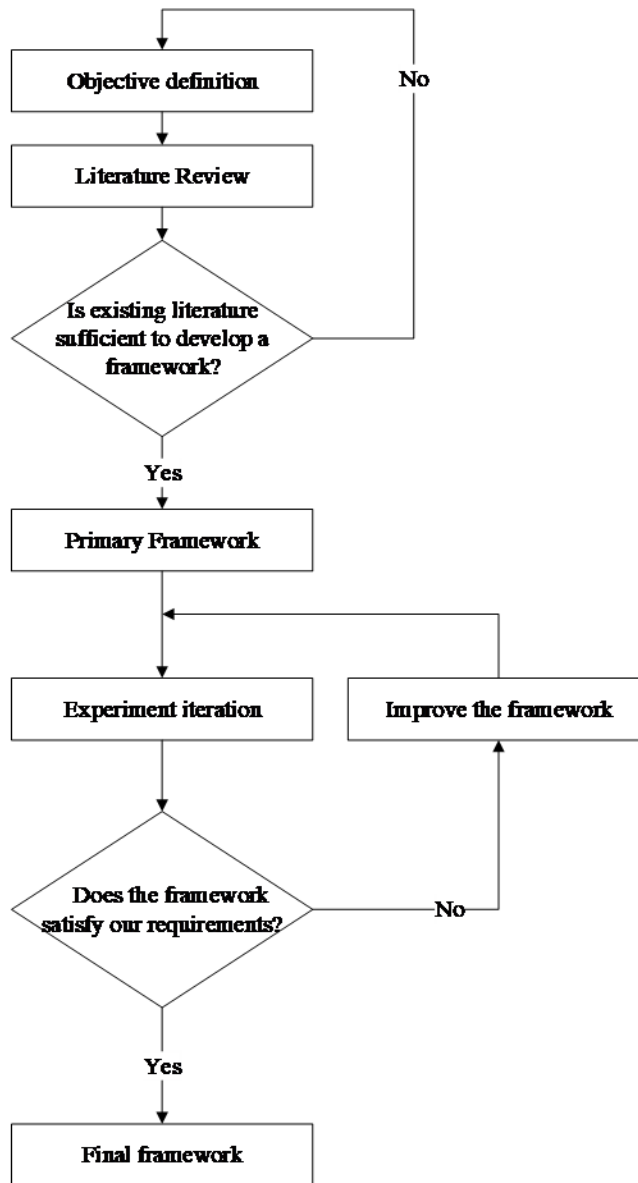


FIGURE B.2 – Méthodologie de recherche

La revue de la littérature a été initialement menée dans le but de trouver des cadres liés au sujet de notre discussion. Puis, en raison du manque de littérature sur cette question, il a été décidé de fixer un autre objectif pour donner une direction à la revue de littérature qui aidera à atteindre un cadre approprié. Cet objectif est d'examiner l'évolution des MMs dans le contexte de l'Industrie 4.0. Une revue de la littérature avec cet objectif aide à analyser les exigences potentielles dues à l'émergence de l'Industrie 4.0 et à ses développements connexes. En conséquence, des aspects importants à considérer

pour l'intégration des MMs peuvent être réalisés. Ainsi, la revue de la littérature avec ces analyses sera utile pour créer un cadre approprié pour l'intégration des MMs dans les environnements industriels 4.0.

Pour examiner systématiquement les développements des MMs dans le contexte de l'Industrie 4.0, la méthodologie a été construite de manière multi-étapes :

1. Stratégie de recherche préliminaire La recherche a commencé par l'interrogation de bases de données clés, telles que Scopus, IEEE, Google Scholar et ScienceDirect, en utilisant des chaînes de recherche spécifiques. Ces chaînes contenaient des termes tels que "Manipulateurs Mobiles", "Applications Industrielles", "Industrie 4.0", "Robotique" et "Automatisation".
2. Revue de littérature segmentée
À partir de notre recherche initiale, la littérature se divise en deux catégories :
 - Axée sur l'Industrie 4.0 : Ces articles discutent principalement des concepts et facettes de base de l'Industrie 4.0 mais pourraient ne pas mentionner explicitement les MMs.
 - Axée sur les Manipulateurs Mobiles : Des articles qui discutent de l'évolution, des fonctionnalités et des défis des MMs, potentiellement sans les lier directement à l'Industrie 4.0.
3. Analyse des applications des MMs dans l'industrie
Pour les études qui se sont penchées sur les MMs, un domaine clé d'accentuation était de comprendre leurs applications dans divers secteurs industriels.
4. Synthèse des recommandations de l'Industrie 4.0 pour les MMs
À partir de la littérature centrée sur l'Industrie 4.0, les principaux domaines indiquant des directions potentielles pour les MMs ont été filtrés.
5. Exploration des MMs
Les articles centrés sur les MMs ont été examinés, des défis historiques et émergents, pour tracer leur progression dans le temps.
6. Les MMs dans le contexte de l'Industrie 4.0
Après des enquêtes séparées, une analyse intégrée pour comprendre comment les MMs sont remodelés par les paradigmes de l'Industrie 4.0 a été effectuée.

L'efficacité de cette approche, comparée à d'autres méthodologies, est d'identifier les lacunes liées à l'adoption généralisée des MMs dans l'Industrie 4.0 et de mettre en évidence les domaines nécessitant

plus de recherche.

Les résultats de cette recherche de revue sont présentés dans le Chapitre 2 et ont été publiés dans le journal *Sensors*[9]. De plus, le chapitre 3 explique le cadre final qui a été publié dans le *Journal of Robotics and Autonomous Systems* [10] sur la base du cadre primaire qui est publié dans *Procedia CIRP* [8]. L'organisation détaillée du reste de cette thèse est présentée dans la section suivante.

B.6 Aperçu de l'Industrie 4.0

La fabrication a subi de nombreux changements au fil du temps, y compris dans les concepts et technologies utilisés, ainsi que dans les aspects économiques et sociaux. Il y a quatre ères où les changements sont plus spécifiés, appelées la révolution industrielle. La première révolution industrielle marque le début de la mécanisation des opérations grâce à la puissance de l'eau et de la vapeur. Dans la deuxième révolution industrielle, la production de masse alimentée par l'électricité a été introduite. La production automatisée utilisant la technologie de l'information et l'électronique est apparue dans la troisième, et la quatrième révolution industrielle a amélioré l'aspect numérisation de la précédente.

Le concept de la quatrième révolution industrielle a été créé par le ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche sous le terme "Industrie 4.0" en 2011. Dans son livre du même nom, Klaus Schwab définit l'Industrie 4.0 comme suit : "La quatrième révolution industrielle crée un monde dans lequel les systèmes virtuels et physiques de fabrication coopèrent entre eux de manière flexible au niveau mondial" [11].

Trois de ses caractéristiques clés sont la numérisation, l'échange de données et l'automatisation. En conséquence, l'Industrie 4.0 a rendu possible différents types d'automatisation dans les installations de production avec pour objectif d'améliorer les processus de travail et de maximiser la productivité. La figure B.32 montre les étapes du chemin de développement de l'industrie 4.0, fourni par FIR eV à l'université RWTH Aachen en tant qu'outil pour évaluer la maturité pour aider les entreprises dans leur transformation vers l'industrie 4.0 (Acatech 2017, avec l'aimable autorisation de FIR eV à l'université RWTH Aachen).

Techniquement, l'industrie 4.0 peut être définie comme l'augmentation du niveau de numérisation et d'automatisation d'un système de fabrication et le développement d'une chaîne de valeur numérique pour permettre le contact entre les produits, leur environnement et les partenaires commerciaux [12].

B.6. APERÇU DE L'INDUSTRIE 4.0

La numérisation d'une entreprise est considérée comme une condition préalable pour que les entreprises participent à la quatrième révolution industrielle, comme Amaral et al. [13] l'ont présenté dans des études de cas pour montrer le rôle important de l'augmentation du niveau de numérisation dans l'entrée sur la voie de l'industrie 4.0. Cependant, ils estimaient que toute forme de numérisation ne pouvait pas conduire une entreprise vers la transformation de l'industrie 4.0. La numérisation doit se faire sur la base d'une conception basée sur l'industrie 4.0.

Komenda et al. [14] ont proposé un guide pratique pour la numérisation et les stratégies de sécurité des CPPS basées sur un cas d'utilisation de la collaboration homme-robot. Li et al. [15] et Böhner et al. [16] ont expliqué l'importance des usines d'apprentissage à intégrer avec les technologies numériques et ont fourni une vitrine pour démontrer cette intégration. Ghobakhloo [17] a défini et évalué les onze déterminants qui affectent le déploiement des technologies de l'information et numériques (IDT) dans la fabrication intelligente. Il a également clarifié la complexité de la préséance entre eux, illustrée dans la figure B.3.

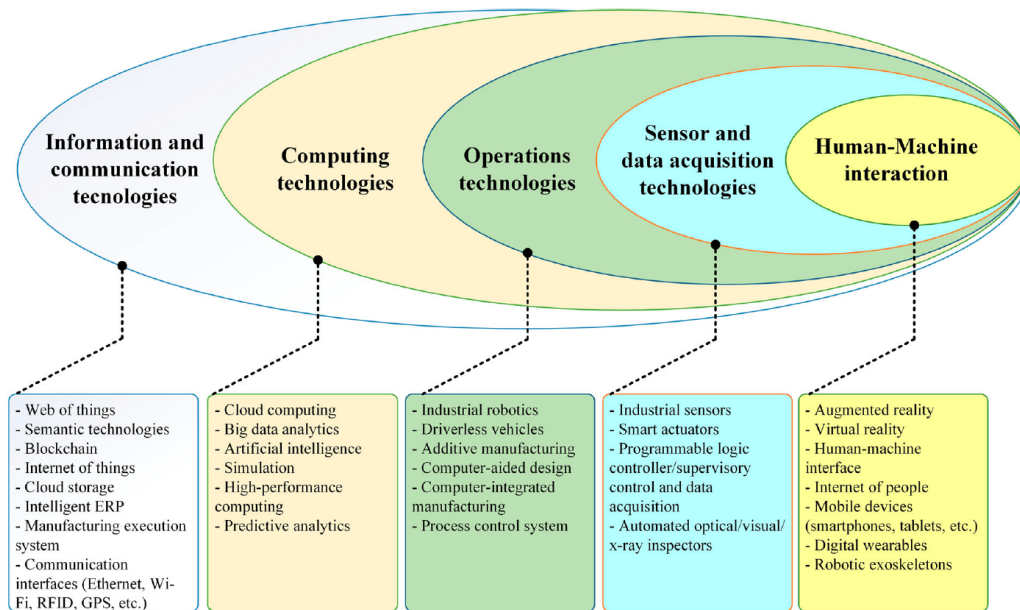


FIGURE B.3 – technologies de l'information et numériques dans la fabrication intelligente adaptées de Ghobakhloo[17]

B.6.1 Systèmes cyber-physiques : le cœur de l'Industrie 4.0

Un SCP est l'intégration de la communication, du contrôle et des systèmes cybernétiques informatiques dans le monde physique [18]. L'objectif des SCP dans l'Industrie 4.0 est de fournir des outils pour faciliter l'intégration des mondes physique et virtuel, où des systèmes embarqués en réseau suivent et gèrent les processus physiques tout en manipulant également les processus d'information. Les systèmes embarqués sont des systèmes informatiques matériels contenant des logiciels intégrés. Ces systèmes sont également basés sur des microcontrôleurs, pilotés par logiciel, fiables, des systèmes de contrôle en temps réel avec une fonction unique et des caractéristiques étroitement contraintes. La différence entre les systèmes embarqués et les SCP est l'échelle, la portée et la vision [19]. Divers capteurs embarqués sont mis en réseau dans les SCP pour détecter, suivre et actionner les composants physiques du monde réel [20].

Rodić et al. [21] ont présenté un SCP intelligent moderne spécifiquement conçu pour augmenter la flexibilité des processus de fabrication et les capacités de collaboration de la robotique de service industrielle conçue pour un travail coopératif avec les humains dans un espace de travail organisé par le savoir. Jazdi [22] voit l'industrie 4.0 comme l'utilisation simultanée des SCP, de l'IoT et des services et croit que pour étendre un système embarqué à un SCP, une interconnexion via Internet ou un réseau similaire est nécessaire. Monostori et al. [20] présentent un modèle de maturité basé sur cinq niveaux définis : Établir les bases, créer de la transparence, augmenter la compréhension, améliorer la prise de décision et s'auto-optimiser, comme le montre le modèle de maturité des SCP adapté de Monostori et al. Figure B.4. "Conditions générales" sont les infrastructures de base pour l'exécution des SCP. Le terme "génération d'information" fait référence à la nécessité de disponibilité en temps réel des données dans toutes les opérations des SCP. Le terme "traitement de l'information" fait référence aux outils actuels pour agréger les données afin d'obtenir de nouvelles connaissances. "Liaison d'information" s'applique à l'adaptation du mécanisme des SCP basée sur la collaboration. En même temps, "Réseaux cyber-physiques interactifs" est la dimension la plus avancée qui ne peut être résolue que par la capacité de résolution de problèmes autonome des SCP collaboratifs.

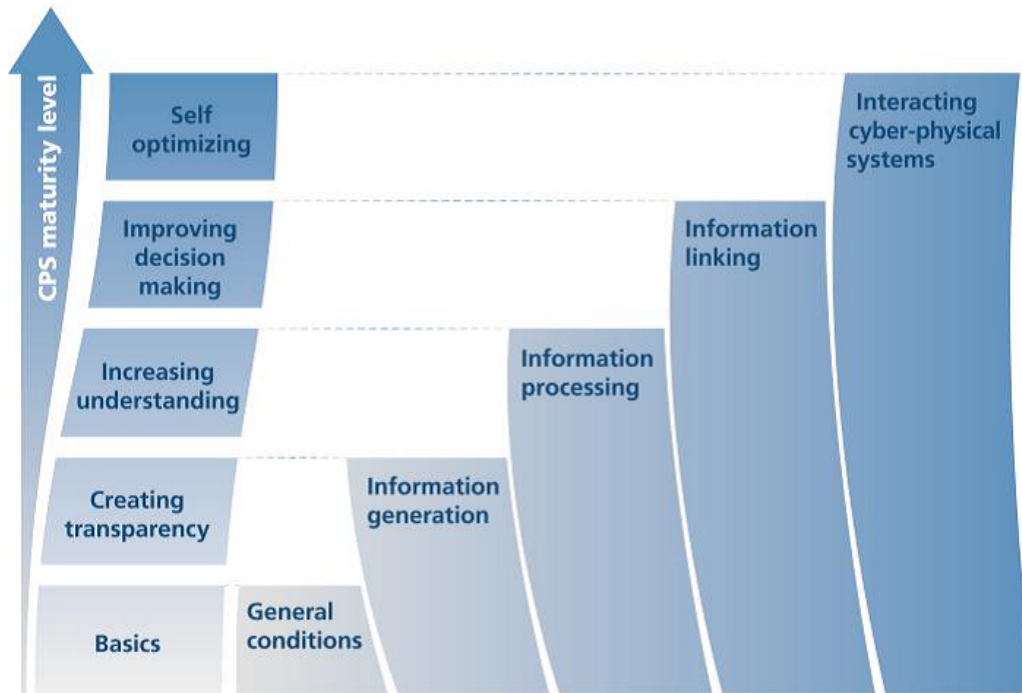


FIGURE B.4 – Modèle de maturité des SCP adapté de Monostori et al.[20]

Wan et al. [23] ont discuté des connexions entre les caractéristiques du machine-to-machine (M2M), des réseaux de capteurs sans fil (WSN), des SCP et de l'IoT, et suggèrent que sous l'architecture de l'IoT, le SCP est une extension du M2M, il est donc possible de mettre à niveau le M2M pour atteindre un SCP en leur donnant une autonomie dans les capacités de contrôle et de prise de décision.

Les Systèmes de Production Cyber-Physiques (CPPS) sont l'application des SCP à tous les stades de la production, des machines intelligentes, aux processus de production, et aux systèmes logistiques. Les CPPS, qui dépendent des innovations les plus récentes et imaginables en informatique, en technologies de l'information et de la communication, et en science et technologie de la fabrication, sont des parties constitutives de la 4ème Révolution Industrielle [24]. Lins et al. [25] ont fourni une standardisation pour la modernisation des anciens équipements et les ont convertis en CPPS basés sur le Modèle d'Architecture de Référence pour l'Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Kuhnle et al.[26] ont examiné les applications potentielles des algorithmes d'Apprentissage Automatique (AA), en particulier de l'Apprentissage par Renforcement (AR), et ont découvert que les CPPS peuvent aider à améliorer la performance opérationnelle en utilisant des algorithmes pilotés par les données avec les données en temps réel fournies par les CPPS.

L'architecture 5C est un guide pour la conception et la mise en œuvre d'un SCP pour des applications industrielles proposée par [27]. Les niveaux de cette architecture sont les suivants et également illustrés dans la figure B.5 :

1. **Connexion** : La première étape consiste à connecter les dispositifs physiques tels que les machines, leurs capteurs et actionneurs via un réseau de communication et à s'assurer d'obtenir des données correctes et fiables. Ces données peuvent avoir différentes sources, capteurs ou contrôleurs d'entreprise tels que les MES, via certains protocoles de transfert de données.
2. **Conversion** : Dans la deuxième étape, il est nécessaire d'obtenir des informations précieuses à partir des données. De cette façon, l'auto-conscience des machines peut être fournie.
3. **Cyber** : À ce stade, où les jumeaux numériques sont présentés, toutes les machines sont connectées à un hub central, il y a donc une capacité pour l'analyse de la performance de tous les composants. De cette manière, une machine qui est devenue auto-consciente à l'étape précédente est maintenant capable d'être comparée à d'autres machines et également à ses performances précédentes pour devenir auto-comparative.
4. **Cognition** : À ce niveau, la conversion de l'information en connaissance se produit. Analyser les informations obtenues de toutes les machines et individuellement peut amener la direction à développer un système d'aide à la décision.
5. **Configuration** : Ce niveau est responsable du transfert des retours d'information du cyber vers l'espace physique et conduit les machines à être auto-configurées et auto-adaptatives.

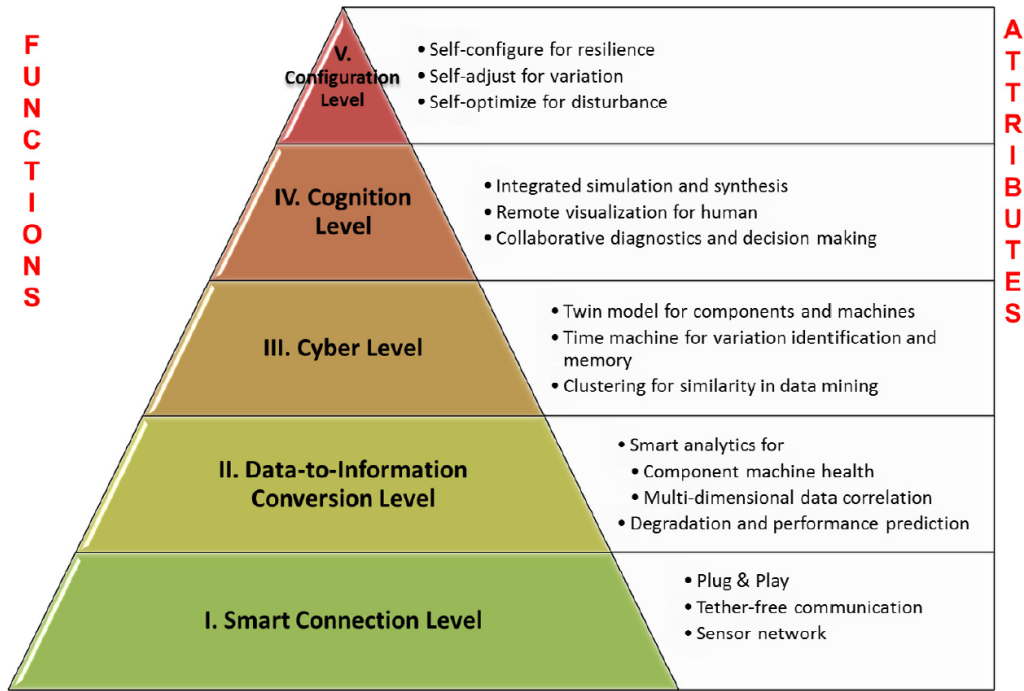


FIGURE B.5 – architecture pour la mise en œuvre des SCP adaptée de J. Lee et al.[27]

B.6.2 Intégration et interopérabilité

L'interopérabilité et l'intégration sont deux des principes clés de l'I4.0 [28]. Divers cadres d'interopérabilité sont proposés, notamment ATHENA [29], C4ISR [30] et EIF [31]. L'intégration réussie de différents briques technologiques dans un système de production 4.0 est un défi majeur pour bénéficier de nouvelles fonctionnalités ou atteindre de meilleures performances. Cependant, il convient de noter que le processus d'intégration est souvent complexe et nécessite un travail préparatoire important. Cela est généralement dû aux incompatibilités entre les systèmes de contrôle de production et les systèmes d'exploitation des briques technologiques. De plus, certaines entreprises qui développent des briques technologiques 4.0 limitent l'accès aux systèmes d'exploitation et ne tiennent pas compte des systèmes existants. Elles proposent souvent des briques technologiques puissantes mais limitent fortement l'accès aux données.

L'intégration des données et des informations pour fournir la disponibilité de l'interconnexion entre les composants du système dépend de la capacité d'intégration de l'information, de l'interopérabilité et de l'interchangeabilité [32]. L'Industrie 4.0 offre de connecter différents composants du système de manière intégrée. Lu [33] croit que l'automatisation industrielle, en tant que l'une des principales

préoccupations des industries, a un effet sur l'intégration industrielle, y compris les technologies et les ressources. Le processus d'intégration rassemble de nouvelles technologies, des concepts de fabrication et des processus commerciaux. Avec la croissance de la complexité des systèmes d'automatisation, le besoin d'une intégration plus efficace augmente.

L'intégration numérique moderne qui permet la collecte de données en temps réel du monde physique et la sortie d'informations du cyberspace, ainsi que la capacité de traitement intelligent des données, d'analyse et de calcul qui composent le cyberspace, sont les deux composants technologiques principaux d'un SCP. Bangemann et al. [34] soulignent particulièrement l'écart entre les technologies modernes, qui viennent avec le terme "systèmes cyber-physiques", et les outils classiques de l'entreprise. Sur cette base, ils fournissent une vue tridimensionnelle de l'intégration au sein de l'automatisation classique. Comme le montre la Figure B.6, ces trois dimensions sont l'entreprise, le cycle de vie du produit et la chaîne d'approvisionnement. La collecte et le transfert de données précises et fiables à d'autres équipements ou l'échange de données avec des systèmes d'entreprise de haut niveau tels que la planification des ressources d'entreprise (ERP) ou MES, entre autres, sont cruciaux pour le développement d'un SCP. Il est nécessaire d'utiliser des protocoles de communication appropriés, tels que TCP/IP, OPC UA et autres, à cet effet. Ces protocoles doivent être évalués pour des facteurs tels que la quantité de données, la vitesse de transfert, la fiabilité et la stabilité, l'accessibilité, la consommation d'énergie, la compatibilité, la capacité du nombre d'appareils connectés, la sécurité, l'intégration sans effort et l'accessibilité à longue portée.

B.7. ÉTAT DE L'ART DE L'AUTOMATISATION ET DE LA ROBOTIQUE INDUSTRIELLE

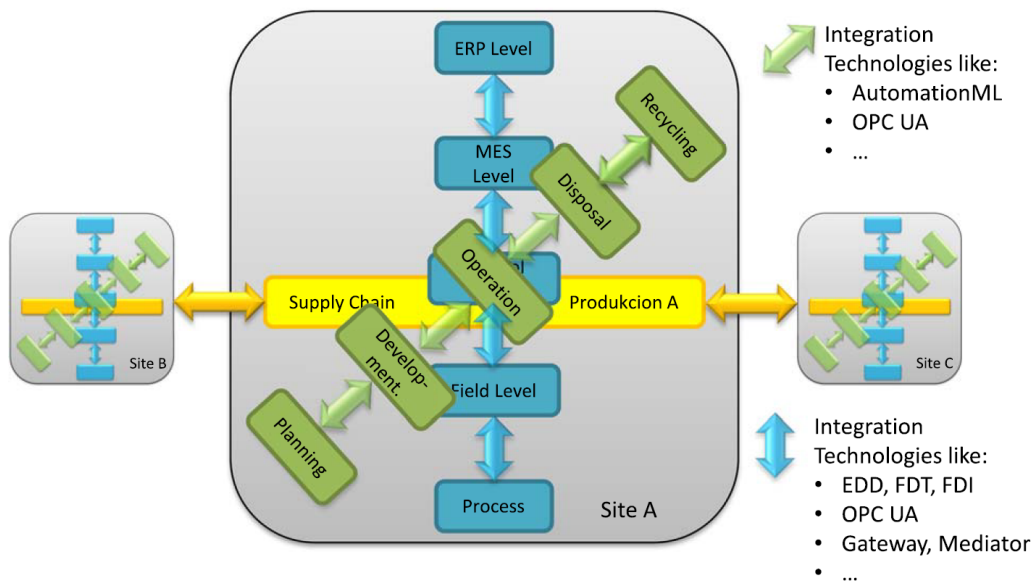


FIGURE B.6 – Dimensions de l'intégration adaptées de Bangemann et al.[34]

Chen et al. [35] donnent une autre classification pour l'intégration d'entreprise : l'intégration physique, l'intégration des applications et l'intégration commerciale. L'intégration physique considère l'interconnexion entre les composants physiques tels que les machines CNC, les robots, les capteurs, les actionneurs, etc., à travers des réseaux informatiques.

B.7 État de l'art de l'automatisation et de la robotique industrielle

Avec l'utilisation de l'automatisation et de la robotique industrielle, la flexibilité de la production peut être atteinte. Il existe différents types de robots qui peuvent aider les industries à améliorer leurs performances. La robotique est un domaine multidisciplinaire qui combine la mécanique, l'électrique et l'informatique, ainsi que la communication et le réseau, l'intelligence artificielle, les capteurs et la technologie des matériaux. On s'attend à ce que les technologies de pointe conduisent les robots à la prochaine génération dans la version 4.0 en leur donnant des caractéristiques plus avancées en termes de collaboration, perception et autonomie. Les auteurs [36] croient que les systèmes d'exploitation pour robots (ROS), les systèmes d'entraînement intégrés, les capteurs, la communication, l'interaction naturelle homme-robot et l'apprentissage profond sont les technologies cruciales qui aident les robots industriels à être plus collaboratifs, précis et autonomes.

B.7.1 Robotique au fil du temps : nouvelles caractéristiques et passage à l'intégration moderne

Comme l'industrie a connu différentes révolutions, différentes versions de la robotique sont apparues au fil du temps. Selon Gao [36], la première génération a été créée pour éviter les tâches répétitives et fatigantes pour les humains; avec l'utilisation de servomoteurs, de contrôleurs et de moteurs d'entraînement (Motorisation). Dans la deuxième version des robots, la vision a été ajoutée en utilisant différents types de capteurs et de caméras. De plus, obtenir des informations et recevoir des retours a permis une nouvelle application robotique. La robotique 3.0 est une version numérique des robots. Elle est connectée de manière transparente, précise et avec plus de capacités d'échange de données. Dans cette version, le concept de l'Industrie 4.0 affecte les caractéristiques des robots en exploitant certaines technologies telles que l'IoT. La collaboration homme-machine, le concept de SCP dans la robotique [37], et les jumeaux numériques pour la robotique sont quelques exemples mentionnés dans la troisième ère de la robotique (numérisation). L'ère de la robotique 4.0 est censée avoir commencé dans les années 2020. Elle se concentre sur le contrôle basé sur le cloud et tente de fournir des interactions plus naturelles entre les machines et entre les humains et les robots. Cette ère développe l'idée d'intégrer l'intelligence artificielle et l'IoT pour développer l'utilisation de données multi-sources et améliorer la qualité de l'interaction homme-robot (collaboration et cognition). Les différents niveaux de la robotique peuvent être résumés comme le montre la Figure B.7.

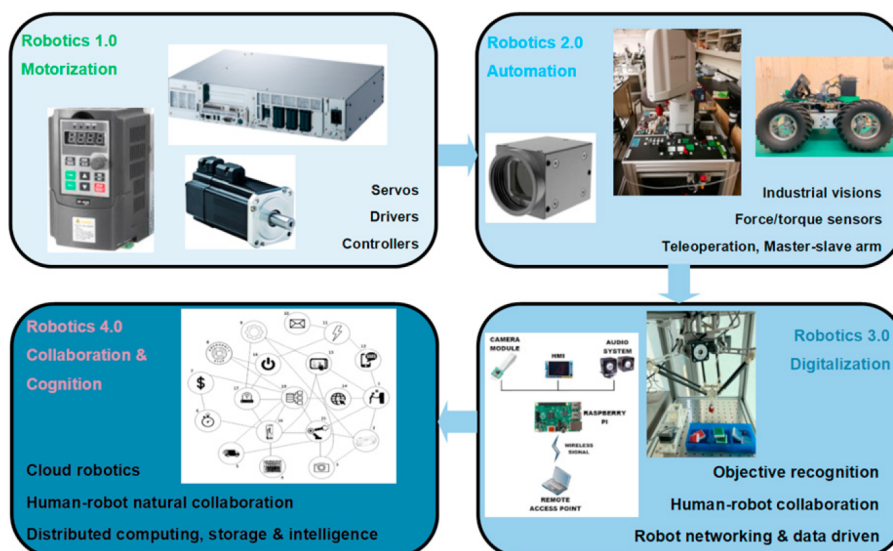


FIGURE B.7 – De la Robotique 1.0 à 4.0 adapté de[36]

Une autre classification de la robotique la divise en robotique industrielle, robotique collaborative et robotique de service selon [38]. Les premiers types de robots ont été construits pour aider avec différentes technologies de production. Ils peuvent avoir trois degrés de liberté ou plus, et en fonction des types de leurs articulations, ils sont adaptés à des applications spéciales. Néanmoins, ils travaillent généralement dans des postes de travail isolés.

La transition des robots industriels classiques aux robots collaboratifs est l'un des changements les plus efficaces dans le développement de la flexibilité et de la performance des usines. Grâce aux robots collaboratifs, l'interaction entre les humains et les robots a pris une autre forme. Une zone sûre est fournie pour les opérateurs humains et les robots pour travailler ensemble de manière efficace comme deux collègues honnêtes. Le premier robot collaboratif, le cobot, a été inventé par J. Edward Colgate et Michael Peshkin en 1996 [39]. De plus, ils estimaient que les cobots avaient un grand potentiel pour le contact physique entre les humains et les ordinateurs, ce qui peut être utile dans les processus de manipulation de matériaux. Aussi, ils prévoyaient d'utiliser les surfaces virtuelles des cobots comme outil en chirurgie en utilisant des images et des écrans tactiles où vous pouvez sentir la surface d'un modèle CAO [40]. Peu à peu, de grandes entreprises dans le domaine de la robotique ont commencé à construire des robots collaboratifs. KUKA, l'une des premières entreprises robotiques, a produit son premier cobot, appelé LBR 3, en 2004. UR5 a été introduit en 2008 par une autre grande entreprise, Universal, pour automatiser les machines CNC. Le robot collaboratif YuMi d'ABB a été présenté pour la première fois au public en 2015. YuMi n'est pas le premier cobot, mais c'est le premier avec un design à double bras. En outre, en 2015, FANUC a lancé son premier robot collaboratif, le CR-15iA. De plus, Panda de Franka Emika est un autre robot collaboratif léger à sept degrés de liberté. Après avoir introduit leur première génération, la plupart des entreprises ont développé des cobots plus compliqués avec diverses fonctionnalités. Ainsi, il existe de nombreuses possibilités de choix pour chaque entreprise souhaitant être équipée de cobots. Ferraguti et al., [41] ont proposé une méthodologie pour aider les décideurs à comparer les différents types de cobots en fonction de paramètres et caractéristiques nécessaires.

Les robots collaboratifs peuvent offrir certains avantages par rapport aux robots industriels traditionnels. Ils peuvent augmenter le niveau d'automatisation dans un environnement hautement sûr pour la coopération humaine. Aussi, en raison du prix inférieur des robots collaboratifs par rapport aux robots industriels, et également, un niveau de flexibilité plus élevé, ils peuvent fournir un retour

B.7. ÉTAT DE L'ART DE L'AUTOMATISATION ET DE LA ROBOTIQUE INDUSTRIELLE

sur investissement plus rapide. Un autre avantage notable des robots collaboratifs est qu'ils sont très mobiles et adaptables, et ils ne nécessitent pas de programmation explicite, ce qui les rend parfaits pour le multitâche. Les robots collaboratifs ont ces caractéristiques, les rendant hautement compatibles avec les normes et les objectifs de l'Industrie 4.0 [42]. Il est même possible d'offrir une recherche pilote qualitative dans laquelle un robot collaboratif rencontre un ouvrier d'assemblage avec des déficiences cognitives et des spécialistes interdisciplinaires dans le contexte de tâches d'assemblage régulières. J. Kildal et al, [43] ont créé des critères de conception pour de telles cellules et les ont comparés aux exigences de conception pour une main-d'œuvre typique.

Malik Bilberg [44] ont proposé une méthodologie systématique pour déployer des cobots dans des cellules d'assemblage existantes pour augmenter la productivité, basée sur le cycle de conception d'ingénierie de Roozenburg. Les auteurs proposent une méthodologie pour établir des paramètres d'évaluation pour un cobot. L'utilisation de simulations virtuelles pour valider et optimiser l'environnement de travail homme-robot est explorée. Leur cadre proposé est illustré dans la Figure B.8.

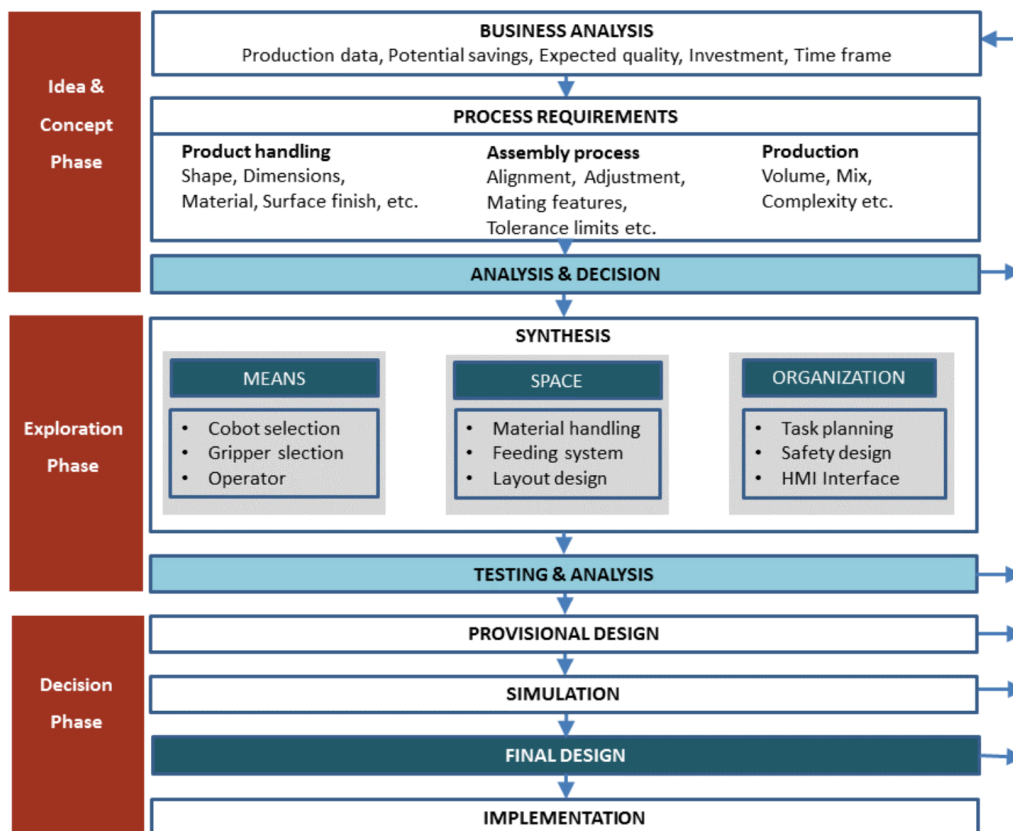


FIGURE B.8 – Cadre pour la mise en œuvre de robots collaboratifs par [44]

Bien que les robots fixes puissent être précis et rapides pour certaines opérations, ils n'apportent pas nécessairement de la flexibilité à la ligne de production. Les robots collaboratifs avec un haut degré de liberté sont plus flexibles pour différents types de tâches, cependant, la mobilité des robots peut apporter d'autres types de flexibilité au processus de fabrication.

Les Véhicules Guidés Automatisés (AGVs) sont spécifiquement conçus pour le transport autonome et la manutention de matériaux dans un environnement contrôlé. Les AGVs fonctionnent généralement sur des chemins ou des itinéraires prédéfinis, souvent guidés par des marqueurs physiques ou des fils intégrés dans le sol ou à l'aide de capteurs pour la navigation. Ils sont programmés pour suivre un itinéraire spécifique, s'arrêter à des emplacements désignés et effectuer des tâches telles que le ramassage ou le dépôt d'objets. Les AGVs sont souvent utilisés dans les usines de fabrication, les entrepôts et les centres de distribution pour transporter des matériaux, des composants ou des produits finis. Ils sont couramment employés pour des tâches répétitives, telles que le déplacement de marchandises entre les lignes d'assemblage ou la livraison de palettes aux emplacements de stockage. Les AGVs sont connus pour leur efficacité, leur fiabilité et leur précision dans l'exécution de ces tâches de transport.

Les Robots Mobiles Autonomes (AMRs), en revanche, sont conçus pour fonctionner de manière autonome dans des environnements dynamiques et non structurés sans nécessiter de guides ou de marqueurs physiques. Les AMRs utilisent des technologies avancées de perception et de navigation, y compris des caméras, des LIDAR et d'autres capteurs, pour percevoir leur environnement, cartographier l'environnement et prendre des décisions basées sur des données en temps réel. Contrairement aux AGVs, les AMRs ont la capacité de s'adapter à des environnements changeants, d'éviter les obstacles et de planifier de manière dynamique des chemins optimaux. Ils peuvent naviguer à travers des agencements complexes, gérer des surfaces inégales et interagir avec leur environnement en utilisant des bras robotiques ou des pinces. Les AMRs sont souvent équipés de capacités avancées telles que la Localisation et la Cartographie Simultanées (SLAM), l'évitement d'obstacles et des fonctionnalités de collaboration homme-robot. Les AMRs trouvent des applications dans diverses industries au-delà de la fabrication et de l'entreposage, telles que les soins de santé, l'hôtellerie et le commerce de détail. Ils peuvent effectuer une large gamme de tâches, y compris mais sans s'y limiter, la manutention de matériaux, la gestion des stocks, l'inspection et même l'assistance clientèle. Les AMRs offrent flexibilité, polyvalence et adaptabilité, les rendant adaptés à des scénarios où l'environnement ou les exigences de tâche peuvent changer fréquemment.

En intégrant un robot collaboratif dans une plateforme mobile, une plus grande flexibilité peut être atteinte. Cette combinaison est généralement appelée manipulateurs mobiles (MMs).

B.7.2 Manipulation mobile : de la recherche à l'industrie

Fondamentalement, les MMs se composent d'un ou de plusieurs bras robotiques montés sur le dessus d'une plateforme mobile. Le système est sûrement équipé de capteurs, d'actionneurs et d'outils appropriés, permettant au MM de se déplacer de manière sûre et autonome en fonction de l'environnement et d'effectuer une tâche basée sur l'outil sélectionné pour l'effecteur final du bras. Les MMs peuvent être conçus pour des fonctionnalités spéciales en adaptant leur taille, forme, charge utile, mobilité, outils et autres caractéristiques. Ils sont conçus pour fonctionner dans des environnements spéciaux qui peuvent être au sol (intérieur ou extérieur, pour des parcours lisses ou turbulents), aériens ou sous-marins. Ils peuvent être conçus pour déplacer des objets sensibles de petite taille ou de grands objets pour de grandes constructions. Les plateformes mobiles peuvent être à pattes ou à roues. Les roues sont plus courantes et peuvent être omnidirectionnelles, holonomiques ou non holonomiques. Les MMs établissent progressivement leur position pour de nombreuses applications telles que dans les domaines agricole, militaire, nucléaire, spatial, minier, de la santé et de l'assistance, domestique, de la recherche et du sauvetage, et industriel. L'objectif principal de cet article est sur les applications industrielles, cependant, certaines des solutions dans d'autres domaines ont été abordées dans certains des projets qui sont discutés dans la suite.

S. Bøgh et al, [45] ont fourni un aperçu des MMs existants du premier prototype en 1984 (MORO) jusqu'à 2010 (Figure B.9). Néanmoins, les origines de la création des MM peuvent être retracées encore plus loin jusqu'au Stanford Research Institute, qui a développé SHAKEY de 1966 à 1972 [46]. Suite à l'aperçu présenté dans la Figure B.9, l'intention est d'introduire des projets plus récents (Figure B.10) qui ont contribué aux progrès des MMs depuis 2010 et de cartographier et de passer en revue les résultats de chacun dans les sections connexes.

B.7. ÉTAT DE L'ART DE L'AUTOMATISATION ET DE LA ROBOTIQUE INDUSTRIELLE

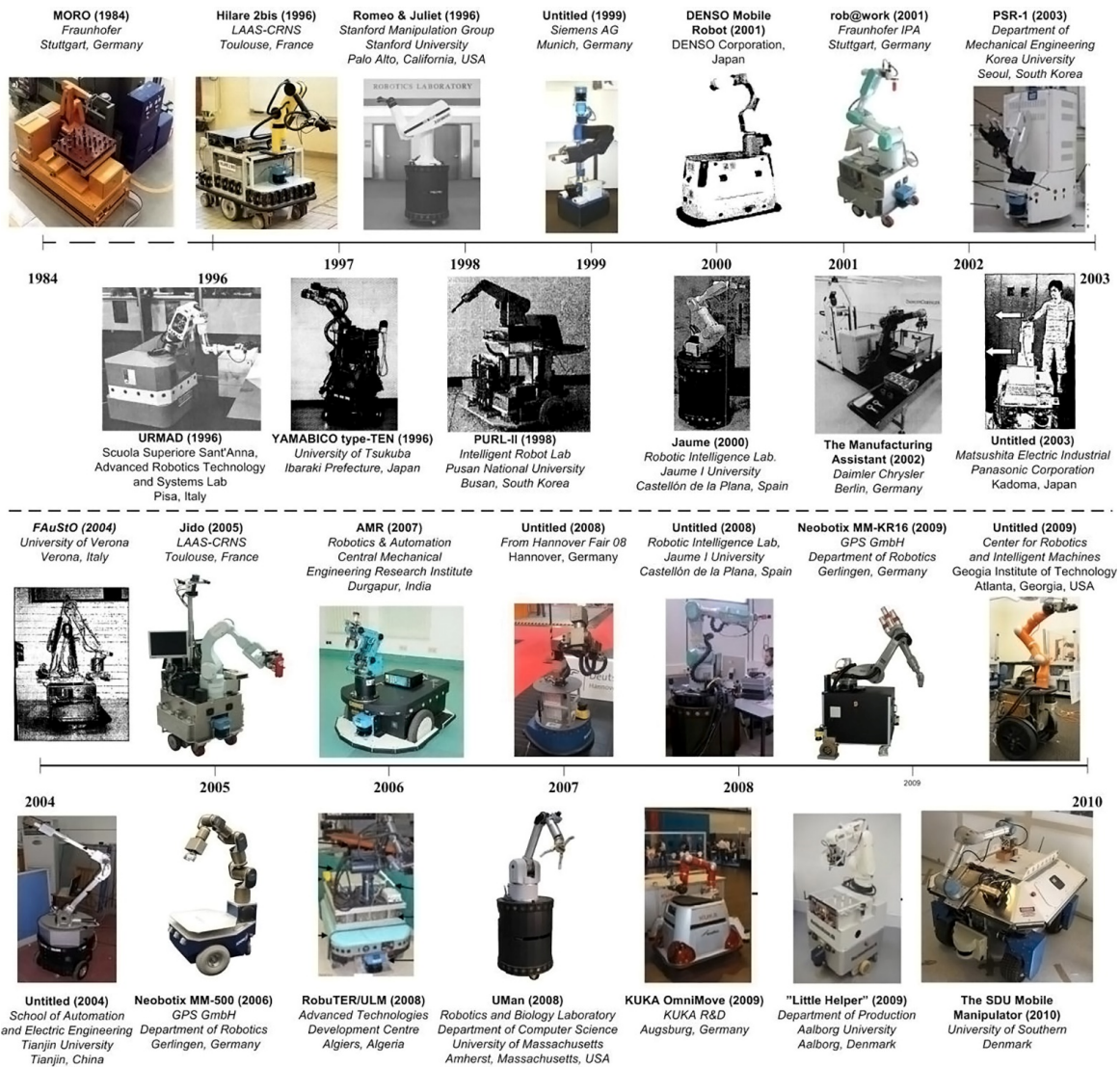


FIGURE B.9 – Chronologie des MMs existants de 1984 à 2010 adoptée de[45]

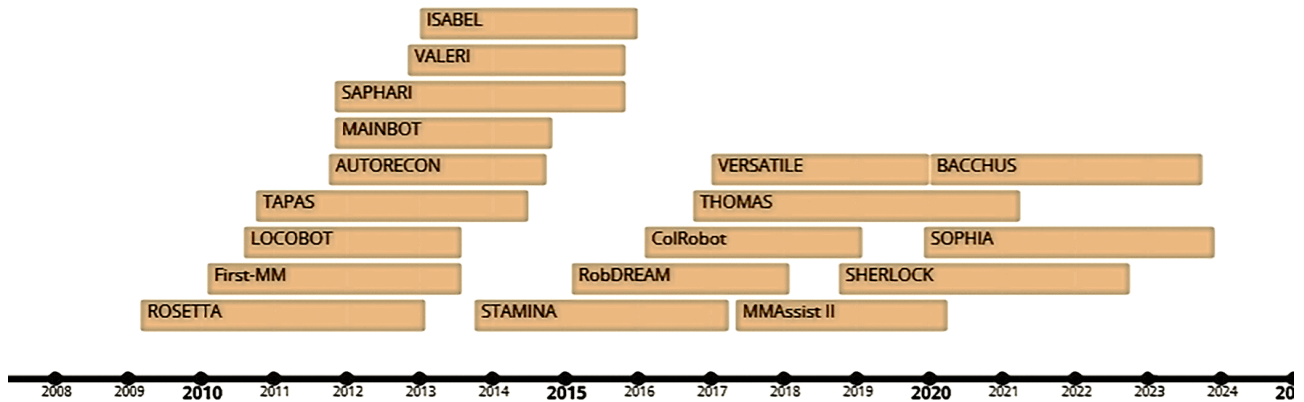


FIGURE B.10 – Une chronologie de différents projets ayant contribué aux développements des MMs

De nos jours, il existe une relation étroite entre la recherche scientifique et les besoins des industries. Parfois, les besoins de l'industrie provoquent la création de projets d'investigation scientifique et la recherche de moyens innovants ainsi que la faisabilité de chacun d'eux. Parfois, les progrès de la science conduisent à trouver des solutions qui n'avaient même pas été envisagées auparavant, tout en aidant à améliorer l'état des usines. Cependant, les entreprises sont plus conservatrices dans l'emploi de certaines solutions nouvelles en raison de divers facteurs, y compris des coûts d'investissement importants, la nécessité de modifier un système existant et réussi, etc. Une étape cruciale pour rendre les MMs plus prêts pour une entrée sérieuse et une adoption généralisée dans les industries est l'intégration et la mise en œuvre des MMs dans des laboratoires ou des systèmes de production réels.

S. Bøgh et al, [45] ont suggéré certains éléments comme infrastructure pour intégrer les MMs dans les systèmes de fabrication. Ils croient que trouver un langage commun entre l'académie et l'industrie est une infrastructure vitale. Le Développement de Nouveaux Concepts (NCD) est une approche pour y parvenir. Selon ce modèle, en fonction des principaux objectifs stratégiques, différentes opportunités peuvent être identifiées et analysées pour aider à sélectionner la meilleure parmi diverses idées qui répondent à chaque opportunité. Ensuite, le concept et le développement de la technologie requise peuvent être réalisés. Ils ont suggéré un modèle de Technologie de Fabrication Poussée par la Technologie (TPMT) pour aider à identifier les opportunités potentielles et leur analyse. Ces méthodologies

B.7. ÉTAT DE L'ART DE L'AUTOMATISATION ET DE LA ROBOTIQUE INDUSTRIELLE

peuvent nous conduire à trouver les meilleures applications pour de nouvelles technologies telles que les MMs. Après cette recherche d'application, il est suggéré de définir des modules et des compétences pour les MMs car un système modulaire peut fournir plus de flexibilité. Pour présenter les applications pratiques de nos technologies sélectionnées dans des contextes réels, il est recommandé d'employer une approche par décomposition où des démonstrations plus petites sont réalisées au lieu d'une seule démonstration complète qui pourrait prendre une période prolongée. Cette approche permet une démonstration plus ciblée et focalisée des capacités de nos technologies, permettant à notre public de mieux comprendre leurs avantages potentiels dans des contextes spécifiques. Une représentation pour atteindre une infrastructure appropriée pour l'intégration des MMs est montrée dans la Figure B.11.

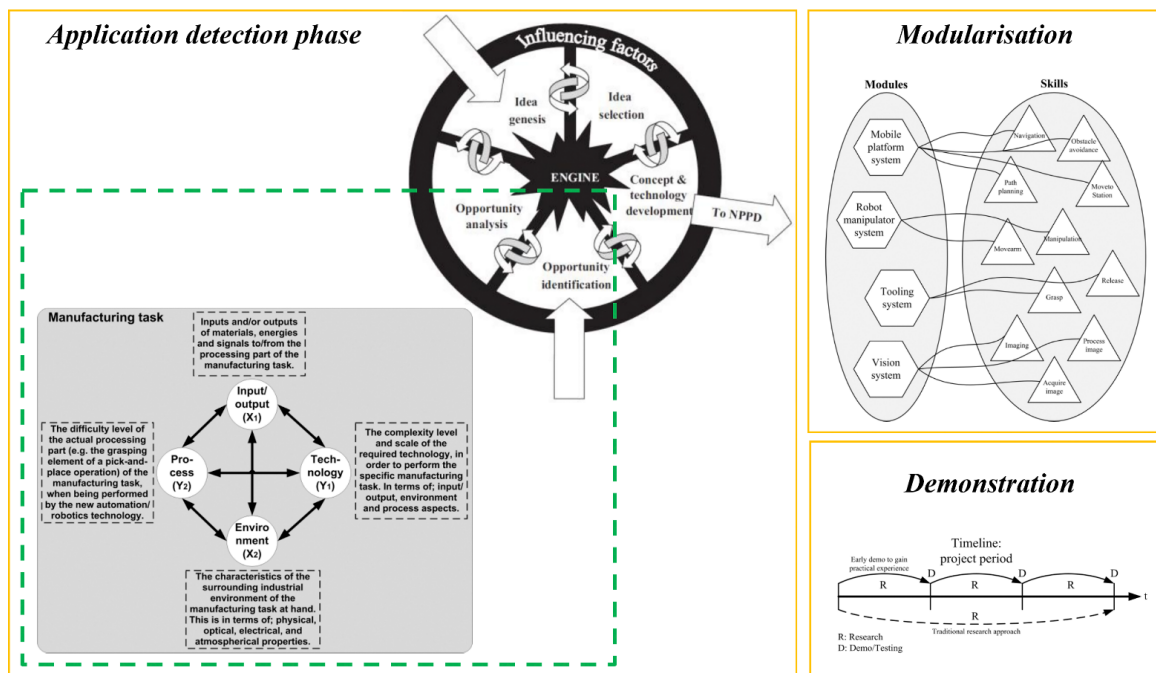


FIGURE B.11 – Une représentation pour atteindre une infrastructure appropriée pour l'intégration des MM inspirée de [45]

B.7.2.1 Manipulateurs mobiles pour applications industrielles

Semblables aux robots industriels traditionnels, les MMs trouvent souvent leur utilité dans des tâches à non-valeur ajoutée, sales et/ou dangereuses, avec les avantages supplémentaires d'une flexibilité opérationnelle accrue, d'un espace de travail étendu et d'une efficacité globale de l'équipement améliorée. S. Bøgh et al, [?] ont étudié les MMs en tant qu'assistants industriels et ont classifié leurs

B.7. ÉTAT DE L'ART DE L'AUTOMATISATION ET DE LA ROBOTIQUE INDUSTRIELLE

applications en logistique, assistance et services (Tableau B.1).

TABLE B.1 – Classification of MM Industrial Applications

Mobile Manipulators Applications		
Assistive Tasks	Logistics Tasks	Service Tasks
Machine tending	Transportation	Maintenance, Repair and Overhaul (MRO)
Assembly/Pre-assembly	Part feeding (multi)	Cleaning
Inspection	Part feeding (Single)	
Process execution		

Les résultats de leur analyse de l'adéquation des MM (dans leur cas les LHs) pour 566 tâches de fabrication manuelles de cinq usines sont présentés dans la Figure B.12, qui montre que la logistique, en particulier le transport et l'alimentation de pièces, a le plus grand potentiel pour une mise en œuvre immédiate de la technologie MM.

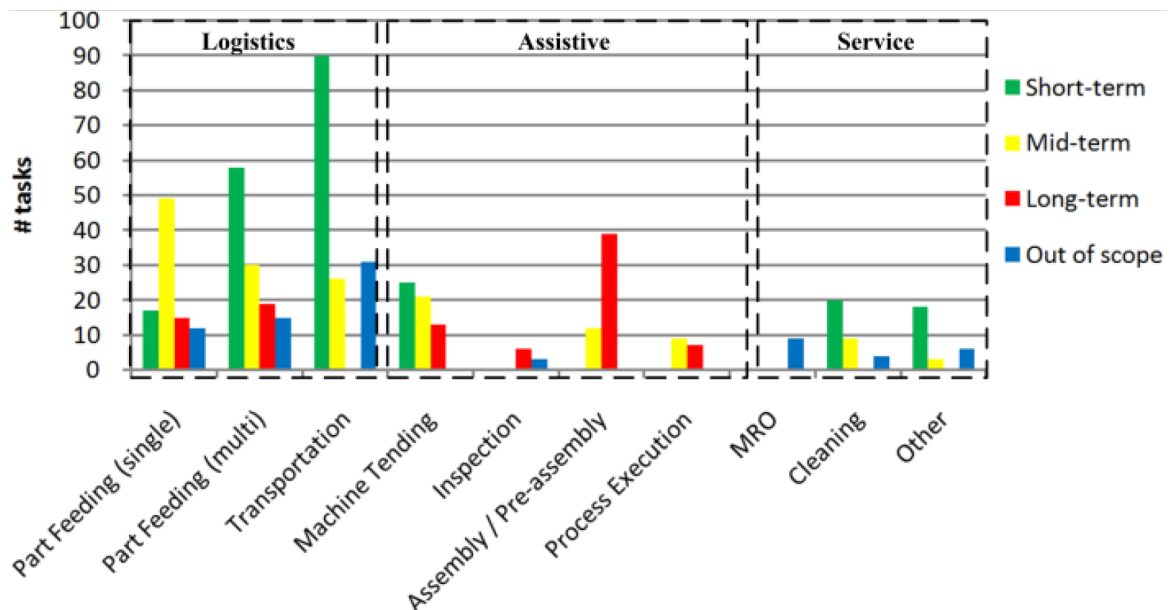


FIGURE B.12 – Adéquation de l'utilisation des MMs pour chaque classe d'opérations industrielles

B.7. ÉTAT DE L'ART DE L'AUTOMATISATION ET DE LA ROBOTIQUE INDUSTRIELLE

Pour les environnements industriels, l'un des MMs connus appelé Little Helper (LH) a 7 versions différentes [47] développées à l'Université d'Aalborg (Figure B.13). Le projet TAPAS inclut des expériences réelles avec des MMs, tels que LH et omniRob, pour évaluer la maturité de la technologie pour une application industrielle et leurs problèmes de planification [48]. S. Bøgh et al, [49] croient que les MMs trouvent leur chemin vers des tâches plus assistées plutôt que les logistiques traditionnelles. Ainsi, ils ont intégré deux types différents de MMs (LH 3 et omniRob) pour collaborer ensemble. LH participe à l'opération d'assemblage de rotors et l'omniRob est déployé pour la logistique (Figure B.15) chez Grundfos. La tâche de planification et de programmation des MMs incombe à un planificateur et contrôleur de mission central (MPC). Les considérations importantes sont le temps de cycle, le temps de déplacement des robots (bien qu'il ait été difficile de détecter uniquement le temps de déplacement, ils ont mesuré un temps moyen combiné), leur capacité, et les objectifs de fabrication. D'un autre côté, les informations environnementales fournies par le MES en tant qu'entrée au MPC (Figure B.14). Pour leurs expériences, les étapes initiales principales qu'ils ont définies sont les suivantes : configuration des MMs, mise en place et vérification des communications, ajustement du poste de travail, configuration de la navigation, programmation, et test. La plupart des erreurs pour les deux MMs ont été annoncées comme étant des échecs de communication et des tâches de manipulation, et leurs défis les plus sérieux en matière de sécurité, d'intégration avec le système de production existant, de problèmes de communication et de manque de gestion des erreurs après la perte de connexion.

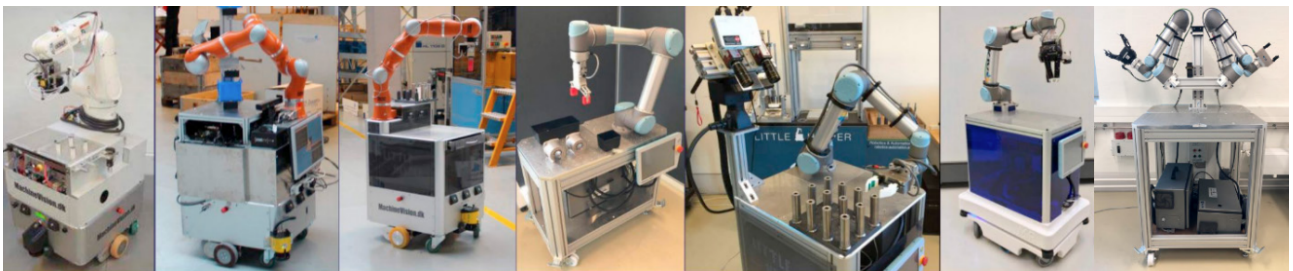


FIGURE B.13 – Petits aides de la première génération à la septième (de gauche à droite) adopté de [47]

O. Madsen et al, [50] ont également couvert la mise en œuvre simultanée de deux MMs pour aider à la production de pompes SQFlex chez Grundfos. Ils se sont appuyés sur la programmation basée sur les compétences et ont employé le même système de planificateur de mission pour la navigation parallèle des deux MMs mais sans mentionner la présence du MES. La performance, la convivialité et

B.7. ÉTAT DE L'ART DE L'AUTOMATISATION ET DE LA ROBOTIQUE INDUSTRIELLE

l'efficacité économique étaient les critères pour les aider à trouver l'écart entre les solutions actuelles et les exigences des utilisateurs. En conséquence, un temps de cycle plus de 20 fois plus long que pour les humains a été observé, ainsi qu'un temps d'arrêt total de 58 minutes dans une demi-journée de travail en raison d'erreurs de navigation, de processus d'assemblage et de communication. Ils ont analysé la raison du long temps de cycle comme étant liée aux limitations de son scénario, de son utilisation, de sa dextérité et de sa capacité à effectuer simultanément un contrôle de qualité. Les principaux défis auxquels ils ont été confrontés concernaient la sécurité, la robustesse, le temps de cycle et la reconfigurabilité et la flexibilité des MMs et de l'environnement.

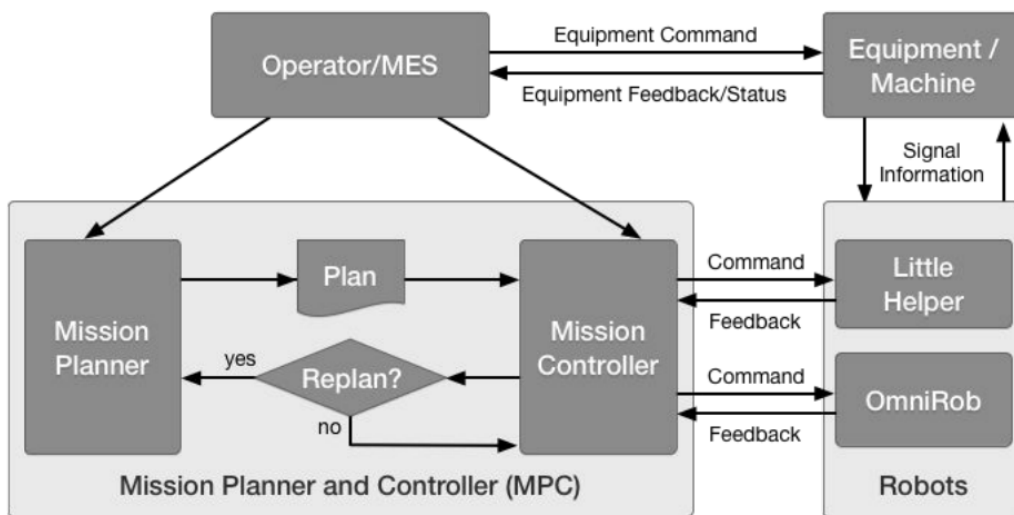


FIGURE B.14 – Le système de contrôle proposé par [49] pour intégrer les MMs dans les systèmes de production

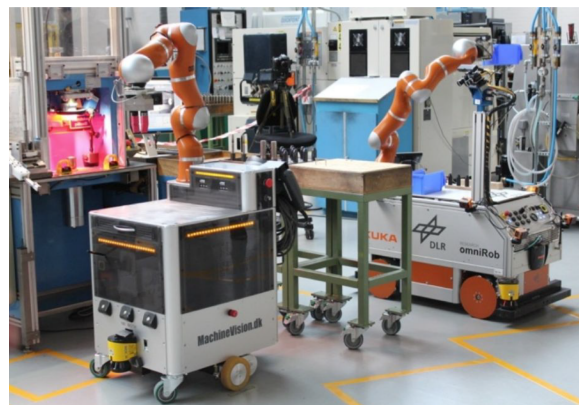


FIGURE B.15 – Little Helper 3 de l'Université d'Aalborg (Gauche) omniRob de KUKA (Droite)

I. Nielsen et al, [51] ont proposé une méthodologie pour implémenter des MMs dans des environnements flexibles de fabrication en nuage. Leur méthodologie commence par la conception des MMs. Flexibilité, modularité, standardisation, autonomie et nature dynamique étaient les indicateurs clés pour choisir le LH pour leur démonstration. Ensuite, ils ont suggéré une application d'alimentation de pièces multiples. Puis, le problème de planification des MMs est mis en évidence avec une modélisation mathématique dans le concept du problème du barman. Pour le contrôle des MMs dans l'environnement de production, ils ont également adopté l'architecture MPC (Figure B.14). Enfin, pour la démonstration dans le monde réel, ils ont évalué leur méthodologie sur le site de production de l'impeller CR 1-2-3.

R. Eckholdt Andersen et al, [52], ont décrit la mise en œuvre d'un LH6 qui effectue une application d'alimentation de pièces avec un système basé sur les compétences (SBS) dans l'usine cyber-physique de FESTO. La conception itérative a été utilisée pour créer le système LH6. Le décalage de la plateforme mobile a conduit à l'imprécision du bras robotique, qui a été compensée par une technique d'étalonnage. Le module a fourni une connexion TCP entre le SBS et le PLC, et deux nouvelles capacités pour appeler et écouter ont été développées pour une intégration transparente avec le SBS. Cinq aspects différents d'une tâche d'alimentation de pièces ont été évalués, et après 25 essais avec 9 échecs, il a été déterminé que la communication entre les modules était le principal goulot d'étranglement de l'exécution et que les erreurs de la plateforme mobile étaient causées par des erreurs de navigation près des emplacements cibles.

L'une des autres applications des MMs concerne le placement et la co-manipulation de grandes pièces d'outillage pour des procédures précises. Selon le cas pilote SOFITEC du projet Sherlock [53], même si les composants en fibre de carbone actuels ne sont pas très lourds, une seule personne ne peut pas les manipuler en raison de leur grande taille (jusqu'à 7m) et de la distance entre les postes de travail. Pour son déploiement, deux personnes sont souvent nécessaires, tandis qu'une personne positionne les instruments restants. Les employés restants n'aident qu'à suivre le leader et à supporter le poids de la pièce, avec un seul opérateur ajoutant de la valeur au processus de positionnement. Les opérateurs travaillent clairement ensemble pour accomplir la tâche, en utilisant des modes de force, visuels et vocaux pour coordonner leurs actions. L'utilisation de MMs à double bras pour le placement et la co-manipulation de grandes pièces composites aéronautiques sur un outillage de processus précis a été étudiée par [54] (Figure B.16).

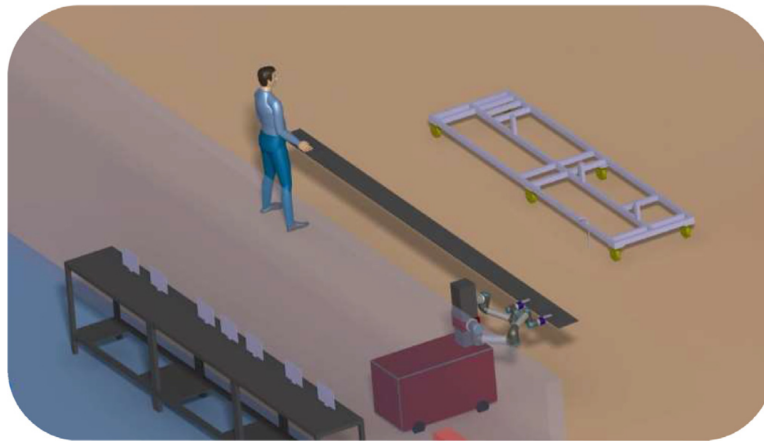


FIGURE B.16 – Utilisation de MM pour transporter de grandes pièces avec la coopération humaine adoptée de [54]

Un autre scénario dans le projet Sherlock se concentre sur la chaîne de montage de capteurs solaires thermiques chez CALPAK [55]. L'opérateur doit assembler diverses variantes de capteurs thermiques qui varient en taille et en poids. L'opérateur doit avoir un accès bilatéral tout en soulevant et en déplaçant les volumineux capteurs thermiques pour terminer l'installation. Tout au long d'un quart de travail, ces tâches exigeantes doivent être accomplies de manière répétitive. En plus d'un niveau supérieur d'épuisement, des problèmes de douleur chronique tels que la tendinite de la main et des difficultés dorsales sont également produits pour les travailleurs humains. Sherlock a proposé l'utilisation d'un MM collaboratif à charge utile élevée (Figure B.17). Alors que l'opérateur se concentre sur de petites tâches d'assemblage, le robot à charge utile élevée gère la charge lourde. Les dispositifs de détection embarqués activés par l'IA surveillent les mouvements de l'opérateur, assurant un assemblage approprié en examinant l'ordre des différentes procédures. De plus, les outils de visualisation en réalité augmentée (AR) qui montrent à l'opérateur les étapes à suivre dans le processus d'assemblage sont utiles.

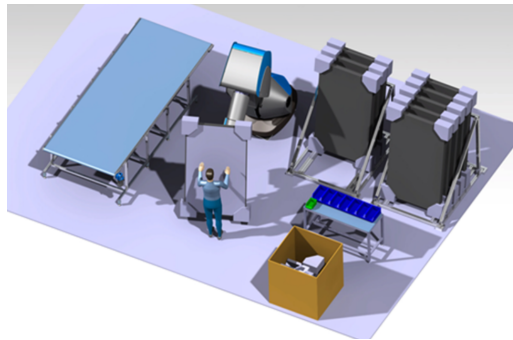


FIGURE B.17 – Utilisation d'un MM collaboratif à charge utile élevée pour l'assemblage chez CALPAK adopté de [55]

L'assemblage de pompes hydrauliques et l'assistance du soudage manuel à l'arc métallique au gaz par l'utilisation du MM rob@work sont deux applications discutées dans [56]. La Figure B.18 présente des applications MM de logistique et d'assemblage dans le système de fabrication Kuka (à gauche), et l'assemblage collaboratif chez Airbus (à droite) dans le cadre du projet SAPHARI [57].

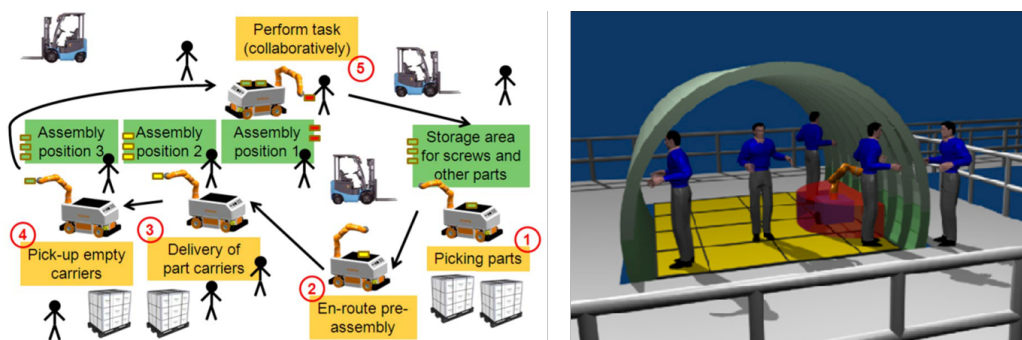


FIGURE B.18 – Projet SAPHARI : applications industrielles requises chez Kuka (à gauche) et exigences d'assemblage d'avions chez Airbus (à droite) adoptées de [57]

Le projet ColRobot intègre une technologie robotique avancée avec les besoins des utilisateurs dans les processus d'assemblage. En utilisant un MM comme "troisième main", le système peut livrer des kits, des outils, des pièces et tenir les pièces pendant que l'opérateur effectue ses tâches en collaboration avec le robot. Deux cas d'utilisation des industries automobile [58] et aérospatiale [59] dans des environnements de fonctionnement réels ont été mis en œuvre et validés dans le cadre de ce projet. Un prototype ColRobot (KMR IIWA : Figure B.19) est présenté et testé à l'ENSAM dans [60] pour des opérations de kitting de THALES ALENIA SPACE France (TAS-F). La Figure B.20 montre le prototype ColRobot pour le serrage de fixations et le remplissage automatique dans l'industrie automobile

[?].



FIGURE B.19 – Prototype ColRobot pour l'industrie aérospatiale (KMR IIWA) adopté de [60]



FIGURE B.20 – Prototype ColRobot pour l'industrie automobile adopté de [58]

Le BAZAR, un MM à double bras, a été développé au LIRMM (Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier) à partir de 2016. Il se compose de deux bras KUKA LWR4+ sur le dessus d'une plateforme mobile omnidirectionnelle Neobotix MPO 700 et est présenté dans la Figure B.21. Le projet européen VERSATILE [61] vise à étudier l'utilisation des MMs dans trois applications axées sur l'industrie - l'assemblage de tableaux de bord de véhicules chez PSA, l'assemblage de pièces d'aile d'avion chez AIRBUS, et la maintenance et l'emballage de manches de rasoirs chez BIC. L'introduction du BAZAR et son assistance pour un cas d'utilisation logistique intelligent ont été présentés dans [62].



FIGURE B.21 – MM BAZAR adopté de [62]

Les opérations de recherche et de transport dans les espaces de travail et les environnements partagés avec les humains sont étudiées dans le cadre du projet collaboratif ISABEL (Innovative Autonomous and Intuitively Operated Service Robot for Efficient Handling and Logistics), financé par le Ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche. La capacité de charger et de retirer des pièces de machines, ainsi que de choisir et de placer des objets de manière autonome dans les stations, sont des priorités. En particulier, "l'automatisation des sciences de la vie" et "la fabrication de semi-conducteurs" sont les applications pour lesquelles cela est fait. Chez Infineon, le robot ISABEL a subi des tests réussis dans un environnement de production. Les boîtes de plaquettes ont pu être efficacement ramassées, transportées et alimentées aux équipements dans la salle blanche (Figure B.22) [63].



FIGURE B.22 – Implémentation du MM ISABEL pour la prise et la pose de boîtes de plaquettes dans une salle blanche adoptée de [63]

En raison de sa polyvalence dans l'exécution d'une variété de tâches, telles que l'inspection, la surveillance et la réparation, les MMs peuvent trouver leur place dans la maintenance industrielle. Dans ce secteur, certaines applications sont requises dans le cadre du projet MAINBOT, y compris la

détection d'ubiquité, la détection de fuites, et la surveillance des surfaces et des équipements intérieurs [64]. Le projet MAINBOT implique la création d'applications pour que les robots de service effectuent de manière indépendante des activités d'inspection sur des machines organisées soit horizontalement (utilisant des robots au sol) soit verticalement (robots grimpeurs) dans de grandes installations industrielles. Afin d'atteindre les objectifs industriels du projet, MAINBOT vise à utiliser des robots déjà existants pour mettre en œuvre des solutions créatives. Plus précisément, il souhaite fournir un moyen de mesurer divers paramètres physiques à différents endroits à l'aide de robots autonomes capables de naviguer et de grimper sur des structures, de manipuler des capteurs ou d'utiliser un équipement spécialisé de test non destructif [65]. La stratégie utilisée par MAINBOT pour atteindre des objectifs scientifiques et industriels comprend l'analyse des besoins de maintenance et d'inspection dans de grandes installations industrielles, la sélection des opérations d'inspection basées sur divers critères, la conception de modifications dans les MMs existants pour répondre aux exigences identifiées, le développement et l'ajustement des technologies d'inspection à intégrer dans les MMs autonomes, la justification en simulation, l'intégration de plates-formes robotiques et de matériaux non destructibles, et l'intégration de ces éléments dans de nouveaux et anciens robots, la vérification à l'aide d'un modèle réduit, et enfin, dans des études de cas réelles. L'un de ces cas d'étude, qui a été réalisé dans les centrales énergétiques de VALLE, est présenté dans la Figure B.23. L'outil contenant le capteur est positionné perpendiculairement au miroir dans l'opération réelle, et la manœuvre d'approche est effectuée jusqu'à ce que le capteur touche le miroir. Les trois capteurs à ultrasons du porte-outil produisent des signaux qui sont utilisés pour réguler la trajectoire.



FIGURE B.23 – Mesure de la réflectivité du miroir dans la centrale énergétique de VALLE par MAINBOT adoptée de [64]

L'IAAM (Institut pour l'Automatisation Appliquée et la Mécatronique) propose plusieurs projets multidisciplinaires qui combinent la recherche appliquée avec l'application dans le monde réel.

FiberRadar en est un dans lequel le MM OMNIVIL a été utilisé. Une technique de contrôle de qualité est développée pour la production de matériaux composites à fibres de haute résistance dans le cadre du projet de recherche FiberRadar. Avant la coulée, l'approche affiche la structure des fibres en trois dimensions pour montrer les anomalies et améliorer l'empilement et l'écoulement des fibres. Pour permettre un contrôle de qualité plus précis que ce qui est actuellement possible, l'IAAM est chargé de créer un système de mesure transportable pour les composants de grande taille utilisés dans la production d'éoliennes [66].

Avec le secteur automobile comme utilisateur potentiel, le projet STAMINA (Sustainable and reliable robotics for part handling in manufacturing) implique la création d'une flotte de robots capables de réaliser des activités de bin-picking et de kitting dans des environnements peuplés d'humains. La vitesse de la ligne de production, qui est par exemple d'un véhicule par minute pour leur cas d'utilisation chez PSA, détermine le rythme de travail des robots [67].

Dans des industries comme l'aérospatiale et la construction navale, où de grands composants sont fabriqués dans des unités de production fixes, le projet VALERI (Validation of Advanced, Collaborative Robotics for Industrial Applications) explore la nécessité de MMs. Un MM travaillant aux côtés de collègues humains est recommandé dans de tels cas, car des dispositifs robotiques stationnaires spécialisés ne sont pas rentables. La conception systématique d'un tel MM est décrite par K. Zhou et al, [68], avec des considérations matérielles et logicielles pour l'équilibrage des charges, l'efficacité et la sécurité. Les deux responsabilités d'appliquer du mastic et d'inspecter visuellement dans la production aérospatiale sont également couvertes dans leur article (Figure B.24), ainsi qu'une interface utilisateur graphique personnalisable est fournie pour évaluer et valider la conception du système. La Figure B.24 montre le robot qu'ils ont utilisé pour l'opération d'étanchéité, composé d'un bras léger KUKA monté sur une plateforme mobile KUKA omniRob. VALERI est une conception spéciale d'un MM développé pour le projet du même nom. VALERI se compose d'une plateforme mobile KUKA omniRob (avec quatre roues omnidirectionnelles) et d'un robot léger à 7 DoF (KUKA LBR4) sur un ascenseur vertical qui fournit deux DoF supplémentaires avec un axe linéaire et une capacité de rotation, qui a un total de 12 DOF (Figure B.25). Trois applications de cas d'utilisation – l'étanchéité, l'inspection du mastic appliqué et l'inspection de pièces en fibre de carbone tressée – ont été sélectionnées pour que VALERI opère dans les systèmes de production aérospatiaux. Ce projet couvre les questions de sécurité, les technologies de capteurs spécialement conçues pour la sécurité et l'interaction avec les MMs [69], les

B.7. ÉTAT DE L'ART DE L'AUTOMATISATION ET DE LA ROBOTIQUE INDUSTRIELLE

techniques de fusion de capteurs [70], ainsi que la surveillance de l'espace de travail [71], les aspects de collaboration homme-robot tels que la guidance manuelle de MMs redondants [72], et les stratégies de contrôle et les solutions de redondance efficaces [73] pour effectuer plusieurs opérations à la fois pour tirer parti des capacités de l'ensemble du système robotique [74].



FIGURE B.24 – Utilisation du MM dans le système de production aérospatiale d'Airbus Defence Space adoptée de [68]



FIGURE B.25 – Manipulateur mobile KUKA VALERI adopté de [73]

TABLE B.2 – Summary of MM Applications in Various Industries

Citation	Application	Industry	Project	MM	Year
[45]	Multiple part feeding	Grundfos		Little Helper	2011
Continued on next page					

Table B.2 – continued from previous page

Citation	Application	Industry	Project	MM	Year
[49]	Assembly, machine tending, quality control	Grundfos	TAPAS	LH3 and omniRob	2014
[50]	Assembly, quality control, logistics	Grundfos	TAPAS	Two LHs	2015
[51]	Multiple part feeding	CR 1-2-3 impeller line		LH	2017
[52]	Part feeding	Festo cyber-physical factory		LH6	2017
[54]	Placement of common object with human	Aerospace	SHERLOCK		2014
[55]	High payload assembly	CALPAK	SHERLOCK		2023
[56]	Assembly of hydraulic pumps and the assistance of manual gas metal arc welding	Hydraulic pumps	MORPHA	rob@work	2002
[57]	Logistics and assembly	Automotive, Aerospace	SAPHARI	omniRob	2012
[60]	Kitting	TAS-F	ColRobot	KMR IIWA	2020
[58]	Fastener tightening and automatic refill	Automotive industries	ColRobot	ColRobot prototype	2020
[62]	Smart logistic, assembly of vehicle dashboards, assembly of aircraft wing parts, and handling and packaging of shaver handles	PSA, AIRBUS, BIC	VERSATILE	BAZAR	2019
Continued on next page					

Table B.2 – continued from previous page

Citation	Application	Industry	Project	MM	Year
[63]	Fetch-and-carry	Clean room	ISABEL	ISABEL	2023
[66]	Quality control	Production of wind turbines	FiberRadar	OMNIVIL	2021
[67]	Bin-picking, kitting	PSA	STAMINA		2014
[68]	Applying sealant and visual inspection	Aerospace, Shipbuilding	VALERI	VALERI	2014
[65]	Industrial maintenance	VALLLE energy plant	MAINBOT	MAINBOT	2014,2023

B.7.2.2 Manipulateurs mobiles dans l'Industrie 4.0

L'Industrie 4.0 a révolutionné la production et les approches industrielles axées sur l'application de technologies avancées telles que l'IA, l'apprentissage automatique et l'IoT, menant à une nouvelle ère d'automatisation et de numérisation. La robotique ne fait pas exception à cela, et son processus de développement a changé en fonction des besoins de l'Industrie 4.0. Ainsi, les robots ne sont plus seulement des outils pour effectuer des tâches dangereuses ou répétitives, mais sont désormais utilisés de manières nouvelles et innovantes pour améliorer l'efficacité et la productivité. La navigation en sécurité, la séparation des pièces et l'expertise en inspection, l'adhésion aux normes de sécurité, la fiabilité, la durabilité et la capacité à être indépendant du cas d'utilisation et ajustable avec peu de programmation sont les principaux besoins pour les MMs. Les MMs doivent également être gérables par un système de gestion des ressources de l'entreprise, et les employés de l'atelier doivent pouvoir les utiliser et les adapter instantanément à de nouvelles tâches de manutention.

Dans la suite, quelques façons dont l'Industrie 4.0 a changé les robots sont catégorisées.

Connectivité et interopérabilité accrues

L'un des principes de l'Industrie 4.0 est de connecter les composants du système dans une architecture décentralisée. Grâce aux développements dans les technologies de communication IoT et M2M, la connectivité des MMs dans les environnements industriels a été améliorée. Les MMs peuvent désor-

mais effectuer des tâches plus complexes et travailler plus efficacement en collaboration avec d'autres dispositifs grâce à cette connexion améliorée.

L'Industrie 4.0 joue un rôle sérieux dans la standardisation des protocoles de communication tels que OPC UA. Ces protocoles, qui favorisent l'interopérabilité entre différents équipements et systèmes, facilitent l'intégration des MMs dans les processus de production existants.

Collecte et analyse de données

La collecte de données et leur analyse pour obtenir des informations utiles en temps réel est l'un des autres aspects importants fortement recommandés par l'Industrie 4.0. Ainsi, les MMs sont équipés d'une large gamme de capteurs et d'outils de collecte de données pour recueillir et transférer des données dans diverses mesures requises vers le stockage de données managériales. Des algorithmes avancés d'analyse et d'apprentissage automatique peuvent être utilisés pour optimiser la performance du MM lui-même et également pour découvrir l'environnement environnant. La collecte et l'analyse de grandes quantités de données en temps réel aident les MMs à s'adapter à des conditions changeantes et dynamiques, et à optimiser leur performance pour améliorer l'efficacité et la productivité.

L'utilisation de méthodologies d'IA pour découvrir des modèles et des tendances a aidé à prédire les problèmes potentiels avant qu'ils ne surviennent. La maintenance prédictive est l'un des avantages de cette analyse. À des niveaux élevés, une autonomie complète est attendue en fonction de la large gamme de transferts de données de tous les dispositifs du système. Dans de tels systèmes, les outils d'auto-optimisation et de prise de décision sont renforcés.

Flexibilité améliorée

La flexibilité fait référence à la capacité du système à s'adapter rapidement aux changements de conditions, de demandes et d'exigences. L'Industrie 4.0 se caractérise par l'utilisation de technologies avancées pour créer des systèmes de fabrication plus flexibles et adaptables. L'Industrie 4.0 attend des MMs qu'ils fonctionnent de manière flexible, mais aussi qu'ils s'intègrent de manière flexible dans le système de production, de sorte que tout changement dans l'ensemble du système puisse être perçu par le MM et qu'il puisse y réagir de manière dynamique. Pour aborder cette question, différentes recherches ont été menées.

Navigation flexible, planification de trajets, localisation et cartographie

La distinction entre la programmation préprogrammée et en temps réel des algorithmes de plani-

fication communs dépend de la connaissance ou non de la carte de l'environnement. De nombreuses études basées sur des environnements structurés ont été menées dans le passé, ce qui suggère que le CMIM pourrait accomplir la localisation et la navigation par préprogrammation. La tendance de l'Industrie 4.0 a évolué vers un mécanisme plus adaptable, permettant au système de mettre à jour la carte simultanément et donc d'améliorer l'efficacité. SLAM, ou localisation et cartographie simultanées, est une méthode populaire pour structurer le monde en même temps.

La planification des mouvements est difficile en raison des caractéristiques distinctives des MMs. Les algorithmes de planification doivent prendre en compte le comportement du système pour fournir rapidement des plans optimaux. Planifier séparément pour la base mobile et le manipulateur pourrait entraîner des plans inférieurs. Il n'a pas été étudié de manière approfondie comment coordonner les mouvements entre la base mobile et le manipulateur pendant la planification, mais l'application d'approches d'apprentissage automatique pour déterminer les capacités du MM peut aider. La dynamique du système n'est pas fortement utilisée dans les algorithmes de planification utilisés aujourd'hui ; ils se concentrent plutôt sur la conception de chemins géométriques [75]. Le MM innovant (MRP) est développé pour des systèmes de fabrication flexibles en tenant compte des aspects de conception, de navigation et d'ancrage par [76] dans le cadre du projet THOMAS.

La planification de trajet fait référence à la tâche d'identifier un itinéraire sûr et efficace de la position actuelle d'un véhicule à une destination cible tout en évitant les obstacles [77]. C'est un problème vital surtout selon les ingénieurs en contrôle [78]. La planification de trajet du robot mobile peut être divisée en deux catégories : la planification de trajet globale et locale. La planification de trajet globale fait référence à la génération de trajet dans un environnement connu tandis que la planification de trajet locale aborde un environnement inconnu avec des obstacles mobiles imprévus qui peuvent être observés par les capteurs du robot [79]. A. Montazeri et al. [78] ont suggéré quatre critères importants pour un algorithme de planification de trajet comme suit : optimisation, complétude, précision et temps d'exécution. G. Spyros [80] a également classé les méthodes de planification de trajet en trois catégories de contrôle réactif, modélisation du monde représentationnel et leur combinaison. F. Wayne et al. [81] ont formulé un problème d'optimisation pour les MMs en séparant les degrés de liberté (DOF) pour la mobilité et pour le manipulateur. Ils ont développé une méthode de recuit simulé pour résoudre leur modèle. M. Zhao et al. [82] ont quant à eux appliqué un algorithme génétique. La planification de trajet pour un MM de soudage est considérée dans la recherche de W. S. Yoo et

al, [83]. Pour le contrôle d'un MM à deux bras dans le suivi de trajet et le mouvement de point à point, M. H. Korayem et al, [84] ont étudié l'utilisation d'un algorithme de planification de trajet dans l'approche de linéarisation par rétroaction. F. Burget et al, [85] ont proposé une méthodologie de planification BI2RRT (Bidirectional Informed rapidly exploring random tree) pour créer des chemins asymptotiquement optimaux pour les MM sous contraintes de tâche. L'algorithme A* a été utilisé pour le problème de planification de trajet de l'effecteur final du MM par G. Silva et al, [86]. Pour une classe de manipulateurs mobiles souples hyper-redondants qui approchent et manipulent des objets tout en évitant simultanément les obstacles basés sur le champ de potentiel de vitesse, S. Mbakop et al, [87] ont proposé une technique de contrôle de la courbure. Leur méthode est basée sur le concept de mode glissant, qui converge en un temps fini.

Approche stochastique flexible

Une approche stochastique flexible a été fournie par M. Haddad et al, [88] pour la planification de trajectoire point à point de MM non holonomes se déplaçant dans un espace de travail structuré tout en considérant les contraintes géométriques, cinématiques et dynamiques. Afin d'assurer la coordination du mouvement de la base le long du chemin prédéterminé tout en générant la meilleure trajectoire de mouvement pour l'effecteur final, des contraintes cinématiques supplémentaires et des coordonnées généralisées sont choisies dans l'approche de M. Habibnejad Korayem et al, [89]. L'approche pour créer une trajectoire suboptimale pour un MM sous contraintes mécaniques et de contrôle est présentée dans l'étude de G. Pajak et I. Pajak [90]. Le chemin de l'effecteur final est décrit comme une courbe qui peut être paramétrée par n'importe quel paramètre d'échelle. Les contraintes de contrôle, les exigences d'évitement de collision et les limitations liées à l'existence de contraintes mécaniques pour une certaine configuration du manipulateur sont prises en considération. La recherche de M. Gifthaler et al, [91] concerne le défi de la planification de trajectoire cinématique pour les MM sous suivi opérationnel holonomique et contraintes non holonomiques. Ils ont utilisé un SLQ contraint pour leur travail et établi des expériences pour une plateforme mobile de 26 DoF. I. Akli [92] a introduit un indice de pourcentage de manipulabilité (MPI) dans leur recherche pour éviter la singularité et placer le robot mobile dans des zones garantissant un accès régulier.

Planification flexible

L'utilisation d'un cadre de prise de décision pour la planification intégrée des tâches et la mobilité des ressources dans les systèmes de production hybrides est discutée dans [93]. Le cadre modulaire

Robot Operating System (ROS), une plateforme open source qui permet l'interfaçage de plusieurs types et marques de robots, sert de fondement à la conception proposée, la rendant ouverte. En conséquence, il est facile d'inclure de nouveaux types de ressources dans le processus de prise de décision. Le cadre prend en charge la planification des opérations pour l'assemblage de divers composants en interprétant différentes séquences d'assemblage à l'aide d'une méthodologie de modélisation de monde numérique unifiée. En utilisant le comportement du robot mobile comme mesure d'évaluation, tel que le temps d'exécution et la distance de déplacement, le système est capable d'optimiser les plans de tâches créés. Le système mis en œuvre offre également un certain nombre d'améliorations, notamment la capacité de reconfigurer le système de production en déplaçant des plateformes de ressources mobiles vers divers postes de travail selon les besoins, la capacité de générer les plans de mouvement de robot les plus pratiques et efficaces, et la capacité de permettre un accès en ligne au statut en temps réel de l'atelier à l'aide des obstacles identifiés comme entrée. L'approche proposée offre une réponse viable aux défis des systèmes de production hybrides et convient aux systèmes de production de petite et moyenne taille. Cependant, les recherches futures devraient se concentrer sur l'amélioration et le réglage fin du système proposé afin de le rendre utilisable pour une application à plus grande échelle. Le système devrait être intégré au système hérité d'une usine dans cette approche. Cela rendra le cadre de prise de décision proposé plus pratique et pertinent pour une plus grande gamme de systèmes de production en permettant une communication transparente entre les systèmes existants et celui-ci.

Un nouveau problème de planification impliquant un seul MM effectuant des tâches d'alimentation dans une cellule de production est étudié dans [48]. Les planificateurs de mission doivent choisir la meilleure séquence d'alimentation pour réduire le temps de déplacement total du MM tout en tenant compte des caractéristiques uniques du robot et d'une variété de limitations technologiques afin de compléter toutes les tâches dans la limite autorisée de la capacité de la batterie. Dans le but de localiser la meilleure solution, un nouveau modèle de programmation linéaire mixte entier est créé. Pour démontrer l'efficacité de la méthodologie proposée, un exemple réel spécifique d'une ligne de production d'impeller composée de quatre alimenteurs est détaillé. Le résultat a été très approprié utilisé dans des opérations d'alimentation réelles, et il a montré que tous les alimenteurs n'avaient aucun problème à alimenter des composants à la ligne de production. En tenant compte d'un grand nombre d'alimenteurs et/ou d'un long horizon de planification, la complexité du problème classé comme étant NP-dur augmentera. En conséquence, une approche méta-heuristique sera utilisée pour résoudre

le problème de planification à grande échelle du robot mobile. De plus, un système de replanification basé sur des horaires collectés et des entrées de l'atelier sera créé pour faire face aux perturbations en temps réel.

Contrôle et coordination flexibles

Les systèmes de contrôle comprennent un certain nombre de composants, tels que le type de contrôle, la méthode et le contrôleur, dans le but d'améliorer la performance de l'ensemble du système en termes de suivi, de rejet de perturbation, de résilience et d'autres facteurs. En général, il existe trois manières différentes de contrôler les CMIM : manuellement, semi-autonument et totalement autonomement. Le contrôle manuel, une méthode sûre mais complexe de contrôle du système, a reçu beaucoup d'attention dans les études jusqu'à présent. La technique de contrôle semi-autonome offre à la fois les avantages du contrôle manuel et autonome. Le contrôle autonome, qui permet au système d'apprendre et de répondre de manière autonome, est la meilleure manière de créer une industrie complètement intelligente. Le tableau B.3 montre les différences entre les trois types de contrôle présentés par [94].

TABLE B.3 – Comparison of Different MM Control Strategies

System Control	Description	Benefits	Drawbacks
Manual	Fully controlled by humans	Timely error handling	Can be complicated
Semi-automatic	Partial human control	More robust	May be inefficient
Automatic	No human intervention	Efficient	Decision costs can be high

Selon [95], il peut être dangereux d'utiliser un MM entièrement autonome pour certaines tâches industrielles telles que la manutention de matériaux et la tendance des machines car une représentation incorrecte de l'environnement de travail pourrait conduire à endommager des machines coûteuses. À l'inverse, l'utilisation d'un MM entièrement téléopéré pourrait prendre beaucoup de temps à l'opérateur. Pour cette raison, ils ont conçu un MM semi-autonome pour effectuer des tâches de tendance des machines sous supervision humaine de manière sûre et efficace. Utilisant la description de tâche de haut niveau, le robot peut créer des plans de mouvement et fournir des résultats de simulation à un humain pour approbation. L'opérateur humain a le choix de donner la permission au robot d'exécuter

le plan automatiquement créé ou de fournir plus d'informations au planificateur pour améliorer le plan. La personne peut choisir d'utiliser la téléopération pour compléter en toute sécurité l'activité si le modèle d'espace de travail contient des zones avec un haut niveau d'incertitude.

Bien que les MMs puissent être partiellement préprogrammés et semi-autonomes, la variété des environnements industriels peut rendre difficile l'utilisation du système dans diverses situations. De plus, l'intelligence du système à ce stade est insuffisamment avancée pour gérer de manière indépendante certains problèmes ou données peu claires. L'avenir des MMs serait des systèmes entièrement autonomes, permettant au système d'exécuter des tâches complètes par lui-même. Cela peut augmenter la maturité des systèmes en termes de quatrième révolution industrielle, mais le système intelligent doit être fiable et sûr en plus d'être capable de repérer les erreurs à la fois dans les situations organisées et non structurées.

Afin de créer des systèmes de fabrication flexibles, la recherche dans le cadre du projet RedRobCo a suggéré d'employer un capteur de force couple près de l'effecteur final pour mettre en œuvre une programmation sans code et une guidance manuelle naturelle. Utilisant un retour haptique, la structure de contrôle gère les configurations de bras kinématiquement redondants et les évite. L'article contient des expériences en laboratoire sur le MM chimère pour montrer la fonctionnalité de la conception du contrôleur, ainsi qu'une étude approfondie des singularités potentielles [96]. L'intérêt pour le contrôle sans contact des MMs dans des environnements délicats comme les salles blanches est discuté dans le cadre du projet CapSize. [97] a décrit un système de contrôle sans contact basé sur la détection capacitive résistant aux impacts mécaniques, à la saleté, aux occlusions et à un mauvais éclairage. Le capteur peut être intégré dans un espace de travail ou monté directement sur un bras de robot. Pour reconnaître les gestes, une méthode simple basée sur le modèle est utilisée, ce qui la rend facile à adapter à diverses contraintes géométriques. L'article a montré les capacités du système en régulant la vitesse de l'effecteur final d'un MM dans un espace de tâche 3D et en donnant un retour à l'opérateur. De plus, dans le projet CollRob, [98] a discuté de la façon de programmer des systèmes robotiques entièrement sans écrire une seule ligne de code, et présente une méthode pratique pour programmer des MMs délicats avec une guidance manuelle utilisant un capteur de force couple monté près de l'effecteur final. Les résultats des tests en laboratoire sont rapportés, et une explication détaillée de la méthode de contrôle proposée est fournie.

Détection et perception

L'une des premières conditions préalables pour que les MMs fonctionnent dans des systèmes de fabrication intelligents est la capacité de percevoir leur environnement et de prendre des décisions en conséquence. Une grande variété de capteurs et de dispositifs de capture sont développés et en cours de développement. L'utilisation de nouvelles technologies pour améliorer la perception des MMs est abordée dans de nombreuses recherches.

La première étape pour que les MMs perçoivent leur environnement est de déterminer où ils se trouvent par rapport à leur monde environnant. La difficulté d'utiliser la technique de calibration sur les MMs est causée par la variation d'erreur entre la plateforme mobile et les manipulateurs stationnaires. L'approche de calibration œil-dans-la-main a été utilisée dans les publications [99] en utilisant un MM pour identifier les coordonnées réelles des objets dans le système de coordonnées du monde.

L'avancement du matériel (GPU) et des techniques d'apprentissage profond au cours des dix dernières années a grandement profité à la discipline difficile de la vision par ordinateur connue sous le nom de détection d'objets. Avec des algorithmes comme les détecteurs de visage fonctionnant dans de nombreuses applications courantes, la détection d'objets devient de plus en plus la technique IA de pointe dans notre monde moderne. De manière générale, la détection d'objets est une technique pour localiser un objet d'intérêt dans une photo et déterminer s'il est présent. G. Andrianakos et al, [100] ont abordé l'utilisation de la détection d'objets pour surveiller le personnel de la chaîne d'assemblage à l'aide de méthodes d'apprentissage automatique. Lorsqu'une tâche d'assemblage est terminée, le système doit signaler cette information. Il y a deux techniques pour déterminer cela. Comme les pièces doivent être assemblées ensemble, la première est de comparer les emplacements des pièces d'assemblage (PD). Détecter quel objet est saisi par un humain est l'autre méthode (HPD). Comme le dit l'expression, cela peut être difficile à détecter pour les micro-parties, tout en étant efficace pour les plus grandes parties. Afin de s'assurer que le bon travail d'assemblage est effectué et d'éviter les erreurs, l'article a suggéré d'employer une technique de vérification à deux niveaux en utilisant les méthodologies PD et HPD. La recherche a également souligné combien il est crucial d'établir un seuil de probabilité de saisie pour éviter les fausses alarmes et les avantages potentiels de l'adoption de techniques de détection d'erreurs dans l'industrie pour accélérer la production, réduire les déchets et améliorer la qualité des produits.

Le projet BACCHUS (MoBile Robotic PLAtforms for ACtive InspeCtion and Harvesting in Agricultural AreaS) étudie l'utilisation de MMs à double bras dans les zones agricoles pour l'inspection

active et la récolte sélective. Dans le cadre de ce projet, pour une saisie efficace, I. Sarantopoulos et al, [101], [102] ont proposé des approches pour détecter l'objet souhaité dans un environnement encombré et pour faire suffisamment de place autour de lui pour faciliter la cueillette en repoussant les objets environnants. La segmentation instantanée a été étudiée par I. Kleitsiotis et al, [103].

Interaction homme-robot et sécurité

Les robots collaboratifs (cobots) sont une façon significative dont l'Industrie 4.0 a influencé l'IHR pour les MMs. Contrairement aux robots traditionnels, conçus pour fonctionner sans l'assistance humaine, les cobots sont faits pour travailler aux côtés des personnes. L'IHR est devenue plus naturelle et intuitive car les employés peuvent facilement diriger les mouvements du cobot ou même interagir physiquement avec lui si nécessaire. Avec l'augmentation de l'interaction entre les humains et les robots, la sécurité est devenue une préoccupation encore plus critique. L'Industrie 4.0 a également apporté des avancées dans la technologie de sécurité pour les MMs. Par exemple, certains MMs sont maintenant équipés de capteurs et de caméras pouvant détecter et éviter les obstacles, ainsi que de logiciels pouvant prédire les collisions potentielles et arrêter le robot avant qu'elles ne se produisent.

Selon l'utilisation du bras robotique, certains critères doivent être appliqués aux MMs : 1) Le bras robotique se repose lorsque la plateforme mobile est en mouvement : Le bras robotique peut être considéré comme une charge, et l'évaluation des risques pour l'ensemble du danger doit être déterminée en utilisant une analogie avec les normes normales des robots mobiles. La description précise d'un lieu sûr où le robot sera transporté est essentielle. Les normes robotiques doivent être prises en compte pour les interfaces sur lesquelles le robot exécute sa tâche. 2) Le bras robotique effectue des opérations d'assemblage ou de traitement en mouvement : L'évaluation des risques requise doit être effectuée pour le bras robotique en utilisant toutes les normes robotiques [104]. Après cela, l'ensemble de l'application, y compris la plateforme mobile, le bras robotique et la zone environnante, doit être évalué conformément à la norme EN ISO 10218 partie 2, qui aborde l'intégration des applications robotiques industrielles [105].

Une variété d'outils basés sur l'IA sont développés par des chercheurs pour que les robots puissent interagir avec et comprendre les humains plus efficacement. N. Dimitropoulos et al, [54] ont catégorisé ces outils en cinq classes principales. 1. Le "module de perception de processus" est l'un de ces outils, qui utilise la vision par ordinateur pour reconnaître les tâches effectuées par les travailleurs humains. Ce module peut aider le robot à comprendre ce que fait l'utilisateur et à modifier son comportement si

nécessaire. 2. Le "module de surveillance de poste de travail" est un autre outil qui utilise des capteurs pour détecter les obstacles et les employés humains dans l'espace de travail. Ces données sont ensuite transmises aux planificateurs de mouvement du robot et utilisées pour créer un chemin sûr et éviter les collisions. 3. Pour fournir au robot une compréhension plus approfondie de son environnement, le "module de représentation numérique de l'atelier" crée une version numérique de l'espace de travail. 4. Le "planificateur de tâches et d'actions" aide à répartir la charge de travail entre les travailleurs humains et automatisés en déterminant le cours d'action le plus efficace pour chaque tâche. 5. Enfin, les "stratégies d'apprentissage autonomes" permettent au robot d'ajuster son comportement en réponse aux commentaires des travailleurs humains, s'assurant qu'il satisfait leurs besoins et préférences. En combinant leurs efforts, ces outils peuvent faciliter le travail sûr et efficace des humains et des robots ensemble, augmentant la productivité et réduisant le risque d'accidents.

Des techniques d'apprentissage automatique sont utilisées dans le projet ColRobot pour valider la surveillance des lieux de travail et l'identification humaine pour une sécurité flexible [106].

Découvrir les inefficacités dans les postes de travail collaboratifs hybrides homme-robot et les améliorer avec des solutions basées sur l'IA et la mécatronique intelligente est l'une des questions remarquables abordées par le projet SHERLOCK [54]. Dans ce projet, plusieurs articles se concentrent sur la collaboration homme-robot (HRC) [107],[108],[109], [110] tels que le travail sur l'architecture de co-manipulation à double bras avec une communication améliorée [111], l'acceptation psychologique et physiologique des robots par les humains [112], et l'utilisation de l'IA et des dispositifs portables pour l'assemblage collaboratif [113],[114][115]. Le projet comprend également l'utilisation de capteurs de reconnaissance d'activité humaine pour améliorer la performance des MMs collaboratifs [116], [117] en utilisant l'apprentissage automatique [100], et développant une approche de planification de tâches et d'actions dans des cellules collaboratives homme-robot utilisant l'IA [118]. La HRC pour la cueillette et le déplacement d'objets communs avec les humains est discutée dans [119]. [120] a passé en revue l'utilisation du Digital Twin (DT) pour l'amélioration de la HRC.

La sécurité et l'interaction homme-robot (HRI) sont les objectifs principaux du projet SAPHARI (Safe and Autonomous Physical Human-Aware Robot Interaction). Un mouvement de robot sans collision est planifié, et le robot répond constamment à des situations dangereuses inattendues en adaptant son mouvement planifié, en ralentissant ou en s'arrêtant. Cela est réalisé en surveillant en continu l'environnement du robot à l'aide de plusieurs capteurs de profondeur pour recueillir des

B.7. ÉTAT DE L'ART DE L'AUTOMATISATION ET DE LA ROBOTIQUE INDUSTRIELLE

informations sur les obstacles et prédire leurs mouvements. Ces techniques ont été mises en pratique sur omniRob qui peut ramasser, positionner et livrer des objets à des personnes dans un espace de travail partagé tout en améliorant l'itinéraire et le comportement d'évitement de collision pour la plateforme du robot et le manipulateur [121].

Le projet s'est concentré sur deux cas d'utilisation industriels, développés par les partenaires industriels AIRBUS (Figure B.26-gauche) et KUKA (Figure B.26-droite), qui incluent clairement une interaction physique intentionnelle entre un humain et un collègue robot. Sous la direction de DLR, un scénario de service professionnel pour les hôpitaux a été conçu, incluant des interactions quotidiennes étroites entre les professionnels de la santé et un robot assistant [122].



FIGURE B.26 – Démonstrations SAPHARI : à gauche - cas d'utilisation Airbus, à droite - cas d'utilisation Kuka adoptés de [122]

SOPHIA (Socio-physical Interaction Skills for Cooperative Human-Robot Systems in Agile Production) visait principalement à résoudre le problème de la collaboration homme-robot (HRC). Lamon et al. [123] ont suggéré une interface pour les MMs qui leur permet de communiquer en toute sécurité tout en respectant les commandes humaines en utilisant des modules d'admittance haptique et de suivi visuel. La sécurité est également abordée dans [124], qui a présenté MOCA-S, un MM avec une couverture tactile capacitive pour une interaction homme-robot en personne sécurisée.

Le projet THOMAS se concentre sur l'utilisation de robots mobiles à double bras capables de percevoir leur environnement et de collaborer avec d'autres ressources de production, y compris des opérateurs humains, pour construire un atelier reconfigurable. Les objectifs du projet incluent la possibilité de déplacer des ressources et des marchandises, de percevoir le travail et l'environnement, d'équilibrer dynamiquement la charge de travail, de permettre une programmation rapide et l'exécution

des tâches, et d'assurer une HRC sécurisée. Les domaines de recherche au sein de ce projet peuvent être catégorisés en cinq domaines principaux. Tout d'abord, ils ont introduit un MM innovant (Figure B.27) [76] et leur application dans les systèmes d'assemblage [125], et améliorant l'HRI et la HRC en introduisant des dispositifs portables tels que des montres intelligentes [126] et en employant un logiciel basé sur la réalité augmentée [127], [128]. Le développement d'un modèle de monde numérique [129] et de jumeaux numériques pour concevoir et optimiser la conception a été étudié dans [130],[131].



FIGURE B.27 – MM conçu dans le projet THOMAS adopté de [132]

OMNIVIL possède une plateforme mobile conçue en interne avec une cinématique holonomique pour l'agilité dans des environnements dynamiques et non structurés. Il présente trois principales avancées, dont l'une est un système de surveillance de l'espace de travail redondant qui emploie des caméras thermiques et RGB, des capteurs LIDAR et des réseaux neuronaux convolutionnels profonds pour identifier et catégoriser les obstacles et les employés humains. Le paradigme de navigation basé sur des zones évolutives et adaptables utilise un comportement basé sur des cas pour améliorer l'interaction homme-robot (HRI) [133].

Virtualisation

L'Industrie 4.0 permet la virtualisation des MMs en utilisant diverses technologies, telles que la réalité augmentée (AR) et la réalité virtuelle (VR). Ces technologies peuvent être utilisées pour construire des représentations virtuelles de l'environnement et des objets qu'il contient, afin d'opérer à distance les MMs et de voir les activités du manipulateur en temps réel. Les jumeaux numériques (DT)

permettent également d'optimiser la conception des produits, d'améliorer les processus de production et de réduire les coûts de maintenance.

L'Industrie 4.0 attend des MMs qu'ils offrent des capacités de visualisation améliorées, permettant aux opérateurs de mieux comprendre la tâche à accomplir et de permettre une manipulation plus précise des objets. Cela inclut la capacité de visualiser l'espace de travail du manipulateur, de détecter et de suivre les objets, et d'afficher des informations augmentées sur l'environnement. De plus, les MMs sont censés être intégrés avec d'autres technologies de l'Industrie 4.0, telles que l'Internet industriel des objets (IIoT), pour permettre la collecte et l'analyse de données afin d'optimiser la performance et la productivité. Globalement, l'Industrie 4.0 attend des MMs qu'ils fournissent un moyen plus efficace et plus efficace d'accomplir des tâches, avec l'aide de technologies de visualisation avancées.

Pour combiner et mettre à jour l'environnement virtuel avec des données en temps réel provenant de plusieurs modules, y compris amortisseur, barrières, et détection de personnes, [130] a mis en œuvre une infrastructure de jumeau numérique pour une ligne d'assemblage flexible. Pour évaluer l'interaction homme-robot à travers la reconnaissance gestuelle, un scénario a été mis en place dans le moteur de simulation physique GAZEBO et comprenait des fichiers CAD, des contrôleurs virtuels, des données de scanner laser, des données de caméra stéréo simulées, et des données Kinect réelles.

Pour permettre le comportement dynamique des systèmes reconfigurables de HRC, [131] a présenté un système basé sur le DT pour compléter la boucle entre les phases de conception et d'opération. Le DT est combiné avec une logique de prise de décision basée sur l'IA pour créer la disposition du système et les plans de travail. Les actifs physiques et les interfaces unifiées des modèles intelligents DT sont mis à jour dynamiquement pendant l'exécution, créant le scénario de planification en temps réel qui est utilisé lorsque la re-conception est nécessaire. La méthode proposée vise à surmonter les limitations actuelles en matière de séquençage d'exécution et de reconfiguration en ligne des systèmes industriels hybrides. Leur modèle DT fournit les données nécessaires pour optimiser la structure du système en attribuant des tâches aux MMs et aux opérateurs humains dans différents postes de travail. Un groupe de modules de perception est déployé pendant l'exécution pour surveiller l'exécution, l'environnement et le comportement des personnes à l'aide de divers capteurs. Ces capteurs enregistrent des images en 2D et en 3D. Ces données sont synthétisées en utilisant les structures de données DT applicables et utilisées pour peupler le scénario de planification en temps réel en tant que carte d'activité.

Pour bénéficier des avantages du DT, il est nécessaire de résoudre les problèmes avec les CPS et

l'IoT ainsi que les améliorations dans les environnements de simulation avec des moteurs physiques. Une meilleure modélisation des tâches complexes est également requise pour créer des DTs plus précis. Un meilleur flux de données entre les nombreux modules du DT est également crucial. Des avancées supplémentaires dans le traitement des semi-conducteurs et la technologie de communication sont des éléments clés à cet égard [120].

La fabrication dans le cloud - Conformément à l'Industrie 4.0, une approche de production contemporaine connue sous le nom de "fabrication dans le cloud" (CMfg) transforme les ressources de fabrication traditionnelles en services en utilisant le cloud computing, l'IoT et la virtualisation, puis les rend accessibles via Internet. Lorsque nécessaire, l'emploi des différents services de fabrication peut être optimisé en termes de coûts grâce à une plateforme intelligente basée sur le cloud qui les contrôle. Le concept de CMfg englobe chaque étape du cycle de vie d'un produit, de la création et la conception à la fabrication et aux tests jusqu'à la maintenance en cours d'utilisation. La fabrication en tant que service (MaaS) est le terme pour la fourniture basée sur le cloud de ressources de production telles que du matériel et des programmes logiciels, ainsi que des compétences basées sur la connaissance. Les meilleurs services sont choisis, les capacités sont établies, et les commandes sont planifiées et régulées à l'aide de données CAO et de bases de données de machines et matériaux basées sur la connaissance. Dans cette approche, un grand nombre de clients peuvent accéder au mieux à une large gamme de fournisseurs, même ceux qui sont localement distribués, planifier leur propre couche de contrôle et de gestion (couche cloud) et gérer la capacité de production, les processus de fabrication, les opérations et les transactions.

La capacité des MMs à interagir et à communiquer s'est développée au point qu'ils pourraient potentiellement être inclus dans le réseau de production global. Les avantages mentionnés permettent aux MMs de fonctionner efficacement et efficacement dans des environnements de fabrication avancée, en particulier la CMfg, qui a naturellement suivi l'introduction et le succès du cloud computing. Dans la CMfg, les ressources de fabrication (MMs) et la capacité de fabrication (flexibilité des tâches et mobilité robotique) sont offertes pour des demandes dans des sites distincts au sein des usines grâce à une gestion centralisée. De plus, ces avantages des MMs aident les lignes de fabrication CMfg, qui sont destinées à être temporaires par nature, à produire de petits lots tout en permettant également des productions plus longues. En conséquence, la technologie MM a un énorme potentiel pour l'ensemble du secteur de la fabrication et en particulier pour la CMfg [51].

Cybersécurité

La cybersécurité est un aspect critique de l'Industrie 4.0, et les MMs doivent se conformer aux normes et réglementations de cybersécurité industrielles pour assurer la sécurité et l'intégrité des processus de production.

Selon l'Industrie 4.0, les MMs doivent avoir une posture de cybersécurité robuste pour résister à des menaces potentielles telles que les fuites de données, les attaques de pirates informatiques et d'autres activités malveillantes. Pour transférer des données sensibles à d'autres équipements et systèmes sur l'atelier, tels que les spécifications de projet, les plans de production et d'autres informations confidentielles, et afin d'éviter un accès indésirable au système, les MMs doivent disposer de canaux de communication sécurisés.

Les exigences de sécurité des MMs peuvent être catégorisées en attaques basées sur le physique et le réseau [134]. Les interfaces réseau et les ports USB non sécurisés doivent être évités car ils peuvent être utilisés pour installer des logiciels malveillants ou voler des données. Afin de demander de nouveaux travaux et de se connecter avec d'autres machines et personnes, le robot doit être capable d'interagir avec des systèmes externes comme les MES. Cette communication devrait être sécurisée pour se protéger contre les accès non autorisés ou les violations de données. Le robot doit avoir des protections en place pour contrecarrer les tentatives de manipulation par les utilisateurs et les opérateurs pendant le contact sécurisé. Cela couvre à la fois la mise en service initiale sécurisée du robot et la reprogrammation sécurisée par le personnel de l'atelier.

Une architecture pour la sécurité des MMs a été développée et intégrée dans le CHIMERA dans [134]. Avec seulement des canaux désignés reliant les sous-systèmes, l'architecture de sécurité pour le robot CHIMERA est basée sur l'isolement des sous-systèmes. De plus, ils ont réparti la pile logicielle parmi plusieurs équipements physiques, rendant plus difficile pour les attaquants de violer d'autres sous-systèmes. Ils ont déployé AppArmor2 sur les dispositifs pour fournir des autorisations précises pour les utilisateurs et les processus. AppArmor est un système de contrôle d'accès obligatoire qui permet l'isolement de certaines applications en termes d'accès à d'autres ressources (comme les fichiers et les dispositifs). Ils l'ont utilisé pour limiter la modification des composants vitaux du système tout en accordant aux intégrateurs de systèmes un accès limité aux internes du CHIMERA.

B.8 Conclusion

À travers une revue étendue de la littérature provenant de bases de données académiques telles que Google Scholar, Science Direct et Scopus, une activité de recherche significative entourant les Manipulateurs Mobiles (MMs) et leurs applications industrielles a été identifiée. La Figure B.28 illustre les interconnexions complexes entre divers domaines d'étude et leur relation avec les MMs dans le paysage industriel. Bien qu'il y ait une emphase notable sur le contrôle et la navigation, comme illustré dans la Figure B.29, il est évident que la recherche est principalement axée sur les aspects techniques. Cependant, il existe une lacune notable dans la littérature concernant les directives ou cadres pour intégrer de manière transparente les MMs dans les environnements industriels, soulignant le besoin de stratégies qui facilitent leur utilisation efficace.

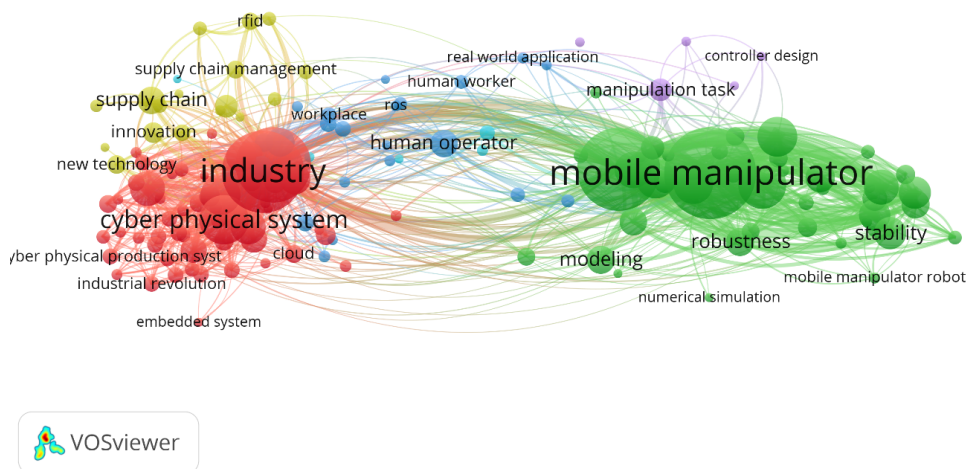


FIGURE B.28 – carte de co-occurrence basée sur des données textuelles

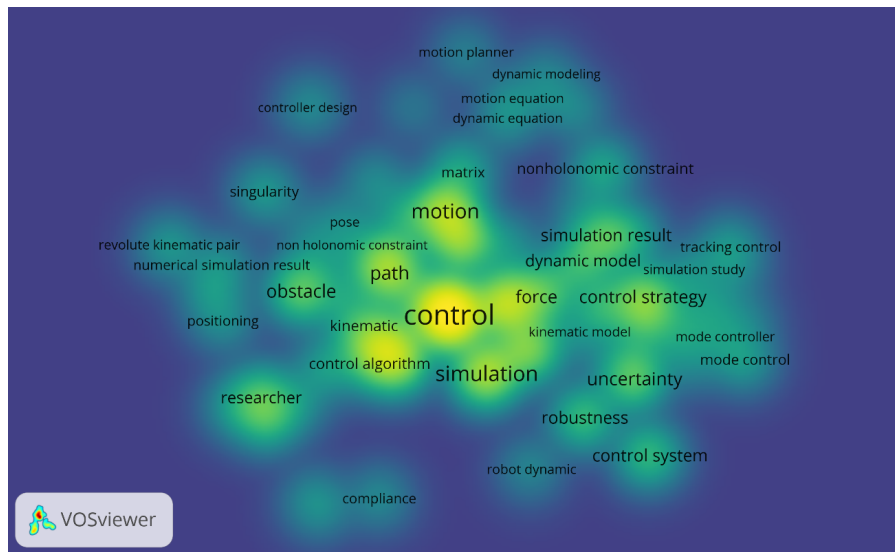


FIGURE B.29 – visualisation de densité des termes liés aux MMs

B.9 Développement du framework

L'intégration de nouvelles technologies, telles que les MMs, dans les systèmes de production existants présente une opportunité d'embrasser les principes de l'Industrie 4.0 et de débloquent de nouveaux niveaux de productivité, d'efficacité et de flexibilité. Pour guider ce processus d'intégration, un cadre complet est requis, englobant les considérations clés et les principes de l'Industrie 4.0.

Le cadre d'intégration proposé est une approche systématique couvrant trois phases principales. Initialement, les "Objectifs et Applications" sont définis. Dans cette phase fondamentale, les rôles et tâches spécifiques anticipés pour les MMs sont clairement définis, garantissant que leur intégration est alignée de manière réfléchie avec les ambitions de production plus larges et aborde les défis uniques et les potentialités de chaque système. Passant de cette couche fondamentale, la phase de "Préparation de l'Infrastructure" commence. Une pré-étude complète est employée comme un outil de diagnostic essentiel, offrant un examen approfondi de la configuration existante. Les forces sont reconnues et les domaines potentiels d'amélioration sont identifiés grâce à cette évaluation minutieuse. Informé par ces perspectives, les modifications d'infrastructure nécessaires sont ensuite proposées, établissant une base propice aux opérations des MMs. Parallèlement, la sélection du MM approprié est réalisée, garantissant la compatibilité avec les objectifs établis et le cadre d'infrastructure adapté.

Enfin, la phase d'intégration se concentre sur un processus d'intégration multifacette. La "Com-

patibilité Physique” et la compétence des robots à accomplir des tâches dans l’environnement de production sont assurées lors de l’”Intégration Physique”. Suivant cela, l’”Intégration Communicationnelle” est priorisée, avec la mise en place des flux de données et des mécanismes d’interopérabilité pour promouvoir des interactions fluides entre le MM et les systèmes existants. Les fonctionnalités du robot sont ensuite synchronisées avec les processus en cours et les interfaces humaines dans le segment de l’”Intégration Fonctionnelle et Opérationnelle”. Enfin, grâce à l’”Intégration Numérique”, le MM est habilement ancré dans l’architecture numérique de l’Industrie 4.0, exploitant des outils avancés tels que les jumeaux numériques et l’analyse en temps réel.

La Figure B.30 fournit un aperçu des phases distinctes du cadre. Une exploration complète de chaque phase suit dans les sections suivantes.

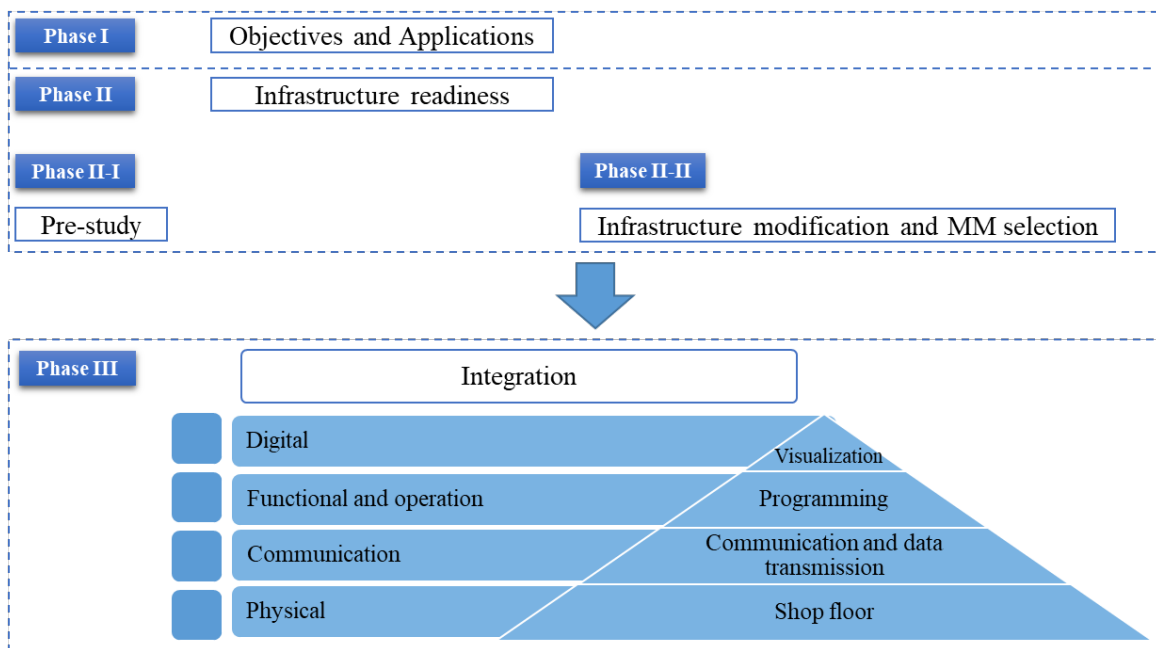


FIGURE B.30 – Phases générales du cadre proposé pour l’intégration des MMs dans les systèmes de production existants

B.10 Phase I : Objectifs et Applications

Dans cette section, un cadre est créé et établi pour intégrer les MMs dans les systèmes de production, avec un accent particulier sur l’Industrie 4.0. Dans ce cadre, les MMs sont considérés comme des systèmes cyber-physiques (CPS) au sein du système global. L’étape initiale implique de reconnaître

l'importance d'incorporer un MM et de comprendre les exigences spécifiques du système de production. Pour déterminer la nécessité et les applications des MMs dans un système de production donné, les deux questions clés suivantes ont été abordées :

- Quelle est la raison d'être de l'utilisation d'un MM dans le système existant ? (Définition des objectifs d'intégration)
- Dans quels scénarios et pour quelles tâches spécialisées, le déploiement d'un MM est-il considéré comme favorable ? (Définition des applications)

La Figure B.31 représente la catégorisation des objectifs et des applications qui sont expliqués plus en détail dans la suite.

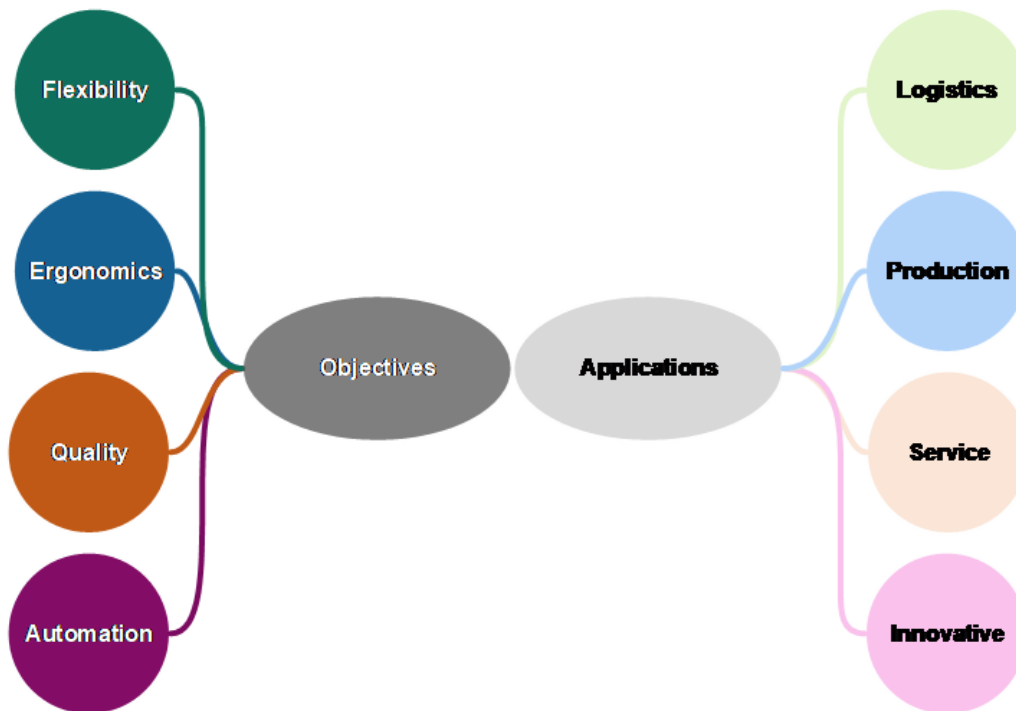


FIGURE B.31 – Catégories clés des objectifs et des applications des manipulateurs mobiles (Phase I du cadre)

B.10.1 Définition des objectifs d'intégration

Pour répondre à la première question concernant l'utilisation des MMs dans un système de production, les raisons de choisir leur présence sont catégorisées en fonction des caractéristiques et des avantages qu'ils offrent. Ces raisons peuvent être divisées en quatre catégories distinctes. Premièrement, les MMs sont employés pour améliorer et étendre la flexibilité du système. Deuxièmement, ils

contribuent à l'automatisation du système, permettant une plus grande efficacité. Troisièmement, les MMs sont utilisés pour améliorer l'ergonomie dans le processus de production. Enfin, leur intégration vise à améliorer la qualité globale des produits fabriqués.

B.10.1.1 Flexibilité

Les systèmes industriels présentent différents types de flexibilité, englobant la flexibilité des machines, la flexibilité des itinéraires, la flexibilité des volumes et la flexibilité de la manipulation des matériaux [135]. Les MMs contribuent à améliorer chacune de ces catégories à des degrés divers.

Améliorer la flexibilité de la manipulation des matériaux est un objectif fondamental dans l'emploi des MMs. En combinant mobilité et capacités de manipulation, les MMs peuvent transporter et manipuler efficacement les matériaux dans l'environnement de production. Ils peuvent naviguer de manière autonome à travers l'installation, ramasser et transporter des matériaux, facilitant des tâches telles que le chargement et le déchargement, le tri et l'assemblage. Les MMs contribuent à rationaliser les opérations logistiques, à optimiser le flux de matériaux et à améliorer l'efficacité globale des processus de manipulation des matériaux.

La flexibilité des machines est la capacité d'une machine à effectuer une variété de tâches, permettant une gamme plus large d'opérations à réaliser avec une seule unité [136]. Comme les MMs sont intrinsèquement adaptables, ils sont capables de multiples tâches avec une seule configuration. Les MMs peuvent également s'adapter rapidement à diverses applications en changeant simplement leurs effecteurs finaux ou outils. En éliminant la nécessité d'une machinerie spécialisée pour chaque opération distincte, cette capacité améliore l'utilisation des ressources et augmente la production.

La flexibilité des itinéraires est un autre domaine où les MMs excellent. La capacité d'ajuster les plans et séquences de production est cruciale pour optimiser le flux de travail et de matériaux [137]. Les MMs, avec leur mobilité, peuvent se déplacer entre différentes stations de production, effectuant sans effort des tâches où qu'ils soient nécessaires. Cette flexibilité permet aux fabricants d'optimiser le flux de matériaux, d'équilibrer les charges de travail et de s'adapter aux changements des exigences de production en toute simplicité. C'est comme avoir un travailleur qui peut passer sans problème d'une station de travail à l'autre, assurant un fonctionnement fluide tout au long du processus de production.

Enfin, **la flexibilité des volumes** est essentielle pour gérer efficacement les volumes de production.

Les demandes fluctuantes nécessitent un système capable de gérer des charges de travail variables sans compromettre l'efficacité [138]. Les MMs offrent une solution évolutive, permettant aux entreprises de les déployer selon les besoins dans différentes stations de travail ou lignes de production. Ils peuvent ajuster dynamiquement la répartition de leur charge de travail et optimiser leurs mouvements pour gérer efficacement des volumes de production élevés ou faibles. C'est comme avoir un travailleur fiable qui peut s'adapter sans problème aux demandes de production changeantes, garantissant une productivité optimale.

B.10.1.2 Ergonomie

Dans le domaine de l'ergonomie, il existe cinq catégories bien connues appelées les "cinq D" qui englobent les conditions de travail difficiles : les travaux sales (dirty), difficiles (difficult), monotones (dull), dangereux (dangerous) et simples (dumb) [139]. Ces termes décrivent des tâches qui sont physiquement exigeantes, mentalement monotones, potentiellement dangereuses, ou simplement inefficaces. Compte tenu des principes de l'ergonomie, la demande de MMs devient évidente car ils offrent des alternatives viables à, ou un soutien pour, les travailleurs humains dans divers scénarios.

Travaux sales se réfèrent à des tâches impliquant la manipulation de matériaux sales ou non propres, tels que l'élimination des déchets ou les tâches de nettoyage. En employant des MMs, ces tâches sales peuvent être efficacement réalisées sans exposer les humains à des substances potentiellement nocives. Les MMs peuvent naviguer dans des environnements difficiles, manipuler des déchets ou nettoyer des surfaces, allégeant ainsi la charge des travailleurs humains et favorisant un environnement de travail plus sain et plus sûr.

Travaux difficiles se réfèrent à des tâches physiquement exigeantes qui peuvent nécessiter une force ou une endurance significative. Les MMs équipés de capacités de levage et de transport appropriées peuvent aider dans ces activités difficiles. Ils peuvent transporter des objets lourds, manipuler des articles volumineux ou effectuer des tâches de levage répétitives, réduisant ainsi la contrainte physique sur les travailleurs humains et prévenant les blessures potentielles.

Travaux monotones englobent des tâches répétitives et ennuyeuses qui peuvent conduire à la fatigue, à l'ennui et à une baisse de productivité. Les MMs peuvent être employés pour automatiser de telles activités banales, permettant aux travailleurs humains de se concentrer sur des tâches plus engageantes et intellectuellement stimulantes. En déléguant le travail monotone aux MMs, les organisations peuvent

améliorer la satisfaction des travailleurs, augmenter l'efficacité et améliorer la performance globale du travail.

Travaux dangereux impliquent des tâches qui comportent des risques inhérents pour la sécurité humaine, tels que travailler dans des environnements dangereux ou manipuler des substances dangereuses. Les MMs équipés de capteurs et de fonctionnalités de sécurité avancées peuvent effectuer ces tâches avec précision et exactitude, minimisant l'exposition des humains à un éventuel danger. En déployant des MMs dans des scénarios de travail dangereux, les organisations peuvent réduire considérablement le risque d'accidents et garantir le bien-être de leur main-d'œuvre.

Travaux simples se réfèrent à des activités qui sont répétitives, basées sur des règles et ne nécessitent pas de prise de décision de haut niveau. Les MMs peuvent prendre en charge ces tâches en suivant des instructions prédéfinies et en les exécutant avec précision. Cela libère les travailleurs humains pour se concentrer sur des aspects plus complexes et cognitivement intensifs de leur travail, où leur expertise et leurs capacités de résolution de problèmes sont mieux utilisées.

B.10.1.3 Qualité

La recherche d'une qualité de produit supérieure constitue une autre force motrice derrière l'inclination à utiliser les MMs. Leur emploi dans des tâches liées au contrôle de la qualité et à l'inspection, ainsi que pour des travaux de haute précision, s'avère instrumental dans la réalisation de cet objectif.

Une raison convaincante d'intégrer les MMs dans les systèmes de production est leur efficacité dans les processus de contrôle de la qualité et d'inspection. Les MMs équipés de capteurs avancés, de caméras et d'outils de mesure peuvent examiner et évaluer méticuleusement les composants des produits ou les biens finis. Ils peuvent effectuer des inspections avec une précision et une constance exceptionnelles, garantissant que les produits répondent à des normes de qualité rigoureuses. En tirant parti des capacités des MMs, les organisations peuvent améliorer la précision et la fiabilité de leurs procédures de contrôle de la qualité, minimisant les erreurs humaines et améliorant la qualité globale du produit.

De plus, les MMs excellent dans l'exécution de tâches de haute précision, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité des produits. Ces machines polyvalentes possèdent la capacité d'effectuer des opérations complexes et délicates avec une précision et une répétabilité exceptionnelles. Qu'il

s'agisse d'assembler des composants complexes ou d'effectuer des ajustements fins, les MMs peuvent naviguer dans des espaces restreints, manipuler des objets avec précision et atteindre le niveau de précision requis qui pourrait être difficile pour les travailleurs humains seuls. En intégrant les MMs dans le processus de production, les organisations peuvent améliorer la précision et la cohérence de leurs opérations, aboutissant à des produits de qualité supérieure.

En exploitant les capacités des MMs pour le contrôle de la qualité, l'inspection et les travaux de haute précision, les organisations peuvent élever la qualité globale de leurs produits. L'intégration des MMs permet aux entreprises de rationaliser les processus d'assurance qualité, de détecter les défauts ou écarts dès le début et d'apporter les ajustements nécessaires rapidement. Cela entraîne en retour une réduction des retravaux, une diminution des taux de rejet des produits et une amélioration de la satisfaction des clients.

B.10.1.4 Automatisation

À l'inverse, dans un sens plus large, les MMs sont couramment employés pour automatiser des tâches qui étaient auparavant effectuées manuellement ou jugées impraticables pour des solutions robotiques.

L'un des objectifs principaux de l'intégration des MMs dans les systèmes de production est l'automatisation d'activités qui étaient traditionnellement exécutées par des travailleurs humains. Ces tâches pouvaient être physiquement exigeantes, répétitives ou chronophages. En déployant des MMs, les organisations peuvent rationaliser les opérations et améliorer l'efficacité en soulageant les travailleurs humains des activités banales ou intensives en main-d'œuvre. Cela permet d'allouer les ressources humaines à des tâches plus précieuses et intellectuellement stimulantes qui nécessitent leur expertise et leurs capacités de résolution de problèmes.

De plus, les MMs s'avèrent bénéfiques dans des situations où la mise en œuvre de solutions robotiques fixes pourrait ne pas être économiquement viable ou pratique. Certaines tâches peuvent ne pas nécessiter de systèmes robotiques dédiés et spécialisés en raison de facteurs tels que des volumes de production faibles, des changements fréquents dans les spécifications des produits ou des contraintes spatiales. Dans de tels cas, les MMs offrent une alternative flexible combinant capacités de mobilité et de manipulation. Ils peuvent naviguer dans des environnements dynamiques, s'adapter à diverses tâches et effectuer plusieurs fonctions avec une seule configuration. Cette polyvalence permet aux MMs

de répondre efficacement aux besoins d'automatisation où les systèmes robotiques fixes pourraient ne pas être le choix optimal.

En exploitant les MMs pour automatiser des tâches auparavant manuelles ou difficiles à automatiser, les organisations peuvent débloquer de nombreux avantages. L'intégration des MMs élimine le risque d'erreur humaine, améliore la productivité, réduit les coûts opérationnels et optimise l'allocation des ressources. De plus, les MMs peuvent travailler en collaboration avec les travailleurs humains, favorisant un environnement de travail synergique qui combine les forces des humains et des machines.

B.10.2 Définition des applications

Après avoir exploré les motivations et les objectifs derrière l'utilisation des MMs dans les environnements industriels, notre attention se porte maintenant sur la deuxième question : les différentes applications des MMs dans l'industrie. Selon [1], les applications industrielles des MMs peuvent être classées en trois catégories principales : logistique, assistive et service. Cependant, une catégorisation plus complète est proposée qui englobe une gamme plus large d'opérations de production. Au lieu d'utiliser la catégorie assistive, une catégorie élargie est suggérée appelée activités de production. De plus, une catégorie supplémentaire est introduite sous le nom d'applications innovantes, qui s'aligne sur les concepts transformateurs introduits par l'Industrie 4.0.

B.10.2.1 Logistique

La première catégorie, la logistique, concerne la gestion et le mouvement efficaces des matériaux dans les environnements industriels. Les MMs présentent des capacités remarquables dans des tâches telles que le transport de matériaux, la gestion des stocks et l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement. Ces machines polyvalentes naviguent de manière autonome à travers l'installation, manipulant et transportant précisément les matériaux, et rationalisant le flux global de matériaux. En intégrant les MMs dans les opérations logistiques, les organisations peuvent améliorer l'efficacité, réduire le travail manuel et atteindre une gestion optimisée de la chaîne d'approvisionnement.

B.10.2.2 Production

S'étendant au-delà de la logistique, la catégorie proposée d'opérations de production englobe une gamme plus complète de tâches. Tout en incluant des activités telles que l'assemblage, la pré-

assemblage, la gestion des machines et l'inspection, cette catégorie englobe également des activités telles que le perçage, le meulage, le vissage, le soudage et bien d'autres. Les MMs jouent un rôle crucial dans ces activités de production en exécutant des mouvements précis, en appliquant une force optimale et en garantissant l'exactitude et la répétabilité. En exploitant les capacités des MMs dans les activités de production, les organisations peuvent améliorer la productivité, améliorer le contrôle de la qualité et favoriser la cohérence à travers divers processus de fabrication.

B.10.2.3 Service

La catégorie service englobe des tâches liées à la maintenance, la réparation et la révision, ainsi qu'au nettoyage. Les MMs peuvent être utilisés dans ces activités pour aider les travailleurs humains à effectuer des réparations précises, à réaliser des inspections et à garantir le bon fonctionnement des machines et équipements. La dextérité et la mobilité des MMs leur permettent d'accéder à des zones difficiles d'accès, d'effectuer des tâches complexes et de contribuer à l'efficacité globale des opérations de maintenance.

B.10.2.4 Innovant

Enfin, la catégorie des applications innovantes correspond aux possibilités transformatrices introduites par le paradigme de l'Industrie 4.0. Cette catégorie embrasse les technologies avancées et les concepts tels que les usines intelligentes, les systèmes cyber-physiques (CPS) et l'intégration numérique. Les MMs jouent un rôle central dans la mise en œuvre de l'automatisation intelligente, de l'analyse des données en temps réel et de la maintenance prédictive. En intégrant les MMs dans des applications innovantes, les organisations peuvent créer des systèmes de production adaptatifs et agiles qui répondent aux demandes du marché, optimisent l'utilisation des ressources et permettent une intégration transparente entre les domaines numériques et physiques.

S'inspirant des étapes proposées pour le développement de l'Industrie 4.0 définies par FIR e.V. à l'Université RWTH d'Aix-la-Chapelle (comme illustré dans la Figure B.32), un ensemble de questions a été formulé dans le but d'évaluer le rôle des MMs dans la facilitation des progrès à travers chaque étape, ainsi que d'identifier les considérations cruciales pour leur intégration. Les premières étapes de ce parcours sont fondamentales pour réaliser les objectifs de l'Industrie 4.0.

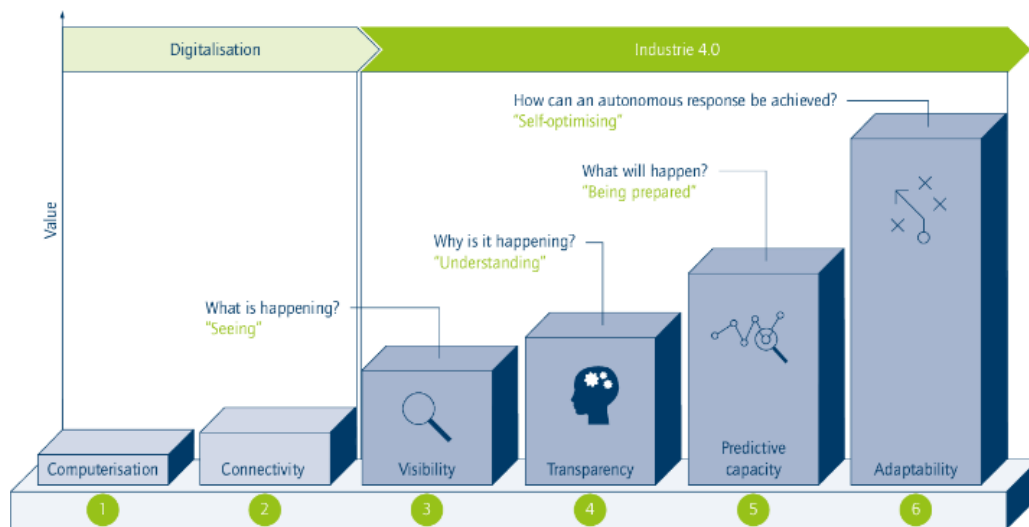


FIGURE B.32 – Niveaux de maturité de l’Industrie 4.0 de FIR e.V. à l’Université RWTH d’Aix-la-Chapelle

Le premier ensemble de questions porte sur l’utilisation des MMs au sein de l’ensemble du système. Cela comprend l’exploration de la manière dont les MMs peuvent être efficacement employés pour améliorer divers aspects de l’écosystème de production. Les applications potentielles et les avantages de l’intégration des MMs dans l’ensemble de la chaîne de valeur sont examinés, allant des premières étapes de l’acquisition des matériaux aux dernières étapes de la livraison du produit. En évaluant le potentiel des MMs à contribuer à chaque facette du système, les organisations peuvent découvrir des opportunités d’optimiser les processus, d’améliorer l’efficacité et de stimuler la productivité globale.

Le deuxième ensemble de questions concerne l’intégration des MMs de manière à leur permettre de posséder des capacités et des fonctionnalités autonomes. Cela implique de considérer comment les MMs peuvent être intégrés de manière transparente dans l’infrastructure existante tout en tirant parti de leurs fonctionnalités uniques. Le potentiel pour les MMs de fonctionner de manière autonome, de s’adapter à des environnements dynamiques et de posséder la capacité d’effectuer une large gamme de tâches indépendamment a été exploré. En abordant ces questions, les organisations peuvent déterminer comment les MMs peuvent améliorer leurs opérations, accroître la flexibilité et contribuer à la réalisation des objectifs de l’Industrie 4.0.

En alignant le déploiement et l’intégration des MMs avec les étapes suggérées pour le développement de l’Industrie 4.0, les organisations peuvent se positionner stratégiquement pour exploiter le po-

tentiel transformatif de ces technologies. L'évaluation complète du rôle des MMs au sein de l'ensemble du système et de leur capacité à posséder des capacités autonomes assure une approche holistique de l'intégration, permettant aux organisations de tirer parti des avantages de l'automatisation, de la connectivité et de la prise de décision basée sur les données.

Les questions proposées agissent comme un guide, mettant en lumière les considérations stratégiques et les opportunités présentées par les MMs à chaque étape du développement de l'Industrie 4.0. En abordant ces questions, les organisations peuvent naviguer plus efficacement dans le processus d'intégration, identifier les domaines où les MMs peuvent avoir l'impact le plus significatif et tracer la voie vers une excellence opérationnelle accrue, une compétitivité renforcée et une croissance durable à l'ère de l'Industrie 4.0.

Informatisation

Dans la première étape de l'informatisation, les organisations se concentrent principalement sur l'adoption de technologies de l'information pour numériser leurs opérations. Cela implique l'utilisation d'ordinateurs et de systèmes logiciels pour automatiser les tâches, gérer les données et améliorer l'efficacité globale. Cependant, pendant cette étape, chaque appareil ou composant est traité comme une entité séparée, fonctionnant indépendamment sans beaucoup d'interaction ou de connectivité avec d'autres parties de l'entreprise. L'objectif principal de l'informatisation est d'améliorer la productivité et la précision en tirant parti des outils numériques. En passant de processus manuels à des systèmes informatiques, les organisations peuvent rationaliser leurs opérations, réduire les erreurs et avoir un meilleur accès aux informations. Cependant, il est important de noter que, à ce stade, l'accent est principalement mis sur les appareils individuels et qu'il existe une communication ou une intégration limitée entre eux.

Connectivité

Les caractéristiques de connectivité et de communication des systèmes cyber-physiques (CPS) aident à recueillir toutes les données en temps réel des composants physiques et à avoir des retours d'information du monde cybernétique [1]. Comme l'indiquent Lee et al. [140], la compréhension des composants physiques et informatiques séparément n'est pas suffisante. L'interaction entre eux est un aspect vital à comprendre. Dans l'Industrie 4.0, la connectivité est définie à tous les niveaux, des activités de production opérationnelle aux systèmes logistiques. Selon [22], un CPS connecté à Internet

se réfère à l'Internet des Objets (IoT). L'IoT, en introduisant divers protocoles de communication via Internet, permet la communication entre les composants et les appareils. À des niveaux supérieurs, cette connexion et communication mèneront à l'interopérabilité qui permet aux CPS de partager des informations mutuellement compréhensibles.

Visibilité

Après avoir exploré les motivations et les objectifs derrière l'utilisation des MMs dans les environnements industriels, notre attention se porte maintenant sur la deuxième question : les différentes applications des MMs dans l'industrie. Selon [?], les applications industrielles des MMs peuvent être classées en trois catégories principales : logistique, assistive et service. Cependant, une catégorisation plus complète est proposée qui englobe une gamme plus large d'opérations de production. Au lieu d'utiliser la catégorie assistive, une catégorie élargie est suggérée appelée activités de production. De plus, une catégorie supplémentaire est introduite sous le nom d'applications innovantes, qui s'aligne sur les concepts transformatrices introduits par l'Industrie 4.0.

Q1 : De quelles manières les MMs peuvent-ils être utilisés pour améliorer la visibilité dans les environnements industriels et faciliter la collecte de données cruciales ?

Q2 : Quels facteurs doivent être pris en compte lors de l'intégration des MMs dans le système pour optimiser la visibilité et faciliter le transfert de données sans heurt ?

Après avoir établi la connectivité au sein du système, l'étape suivante consiste à collecter et à surveiller les données provenant de diverses sources. Ce processus sert de base pour les actions ultérieures. Les capteurs sont largement reconnus pour leur capacité à fournir des données en temps réel, et la Q1 se concentre sur l'exploitation de la mobilité des MMs pour augmenter la visibilité. Les réponses potentielles à la Q1 pourraient impliquer d'équiper les MMs avec des capteurs spécialisés et de les déployer à des étapes spécifiques où la collecte de données est requise. En tirant parti de la mobilité des capteurs, les MMs peuvent collecter des informations à partir de différents emplacements, facilitant une compréhension globale de l'environnement de production. De plus, l'utilisation de caméras embarquées permet aux MMs de capturer des données visuelles à partir de points de vue spécifiques sur la ligne de production en temps réel. Par exemple, la fonction de visibilité de la caméra peut fournir des images des panneaux électriques des machines, qui peuvent ensuite être partagées pour un diagnostic. En cas d'anomalies, le MES peut planifier dynamiquement des interventions à distance ou

sur site.

D'autre part, la mise en œuvre effective des MMs au sein du système nécessite une attention particulière à leurs capacités de communication, ce qui aborde les préoccupations de la Q2. Pour maximiser la visibilité et assurer un transfert efficace des données, il est essentiel de concevoir l'intégration des MMs de manière à faciliter une communication transparente. Cela implique d'établir des canaux de communication robustes, d'assurer la compatibilité avec les systèmes existants et de permettre un échange de données souhaité en douceur. En positionnant et en configurant stratégiquement les MMs dans l'environnement de production, les organisations peuvent optimiser la visibilité et permettre une communication de données efficace, conduisant à une meilleure compréhension opérationnelle et à une prise de décision éclairée.

La Q1 et la Q2 visent toutes deux à explorer le potentiel des MMs pour améliorer la visibilité et la communication des données dans les environnements industriels. En abordant ces questions, les organisations peuvent débloquent des opportunités d'exploiter la mobilité des MMs, leurs capacités de capteur et leur infrastructure de communication pour recueillir des informations critiques, améliorer la conscience situationnelle et permettre des actions opportunes pour une efficacité opérationnelle améliorée.

Transparence

Q1 : Comment les MMs peuvent-ils contribuer à identifier les causes derrière des occurrences spécifiques ?

Q2 : Quelles considérations doivent être prises en compte lors de la mise en œuvre des MMs pour faciliter la compréhension des événements ?

La transparence, qui implique de transformer les données brutes en informations significatives, est une étape cruciale pour obtenir une compréhension complète des événements. Cependant, dans certaines situations, des informations supplémentaires sont nécessaires pour découvrir les causes profondes d'incidents spécifiques. Lors de l'intégration d'un MM, il est possible d'explorer son potentiel en tant que source d'informations supplémentaires pour répondre à ce besoin, comme souligné dans la Q1. Par exemple, exploiter la mobilité du MM pour accéder à des zones dangereuses ou inaccessibles et capturer des images peut offrir des perspectives précieuses pour enquêter sur les raisons derrière les événements. Une autre approche consiste à équiper la pince du MM d'un dispositif de mesure

thermographique, lui permettant de scanner les machines de l'extérieur et potentiellement identifier des conditions thermiques anormales.

La Q2 souligne l'importance des capacités inhérentes du MM dans la fourniture de la compréhension de ses propres fonctionnalités. Cela suggère que la mise en œuvre des MMs devrait considérer leur capacité à fournir un retour d'information en temps réel et des mécanismes d'auto-surveillance. En équipant les MMs de capteurs avancés et d'algorithmes intelligents, ils peuvent analyser activement leurs propres opérations, détecter des écarts ou des anomalies et fournir une compréhension plus profonde de leurs performances et fonctionnalités.

La Q1 et la Q2 explorent toutes deux le rôle des MMs dans l'amélioration de la compréhension des événements. En utilisant leur mobilité, leurs capacités de capteurs et leurs outils spécialisés, les MMs peuvent offrir des informations précieuses sur les causes et le contexte d'incidents spécifiques. De plus, s'assurer que les MMs possèdent des capacités d'auto-surveillance permet une compréhension plus complète de leurs propres opérations. Intégrer les MMs en tenant compte de ces considérations permet aux organisations de tirer parti de leur potentiel pour fournir une compréhension améliorée des événements et faciliter des processus de prise de décision éclairés.

Capacité prédictive

Q1 : De quelles manières les MMs peuvent-ils faciliter le développement d'un système plus prédictif ?

Q2 : Quelles considérations doivent être prises en compte lors de la mise en œuvre des MMs pour améliorer leurs capacités prédictives ?

L'étape prédictive joue un rôle crucial dans la préparation du système pour les situations futures. En analysant les données et les informations, on peut prédire les événements à venir et simuler le système pour identifier et résoudre les problèmes potentiels. Pour y parvenir, il est important de tirer parti des capacités des MMs pour fournir des données pertinentes pour l'analyse, abordant ainsi l'essence de la Q1. Les MMs peuvent contribuer aux capacités prédictives du système global en fournissant des données précieuses qui peuvent être utilisées pour améliorer l'analyse et améliorer les prédictions futures.

L'intégration des MMs avec le jumeau numérique ou l'ombre numérique du système est d'une importance capitale (Un jumeau numérique est une représentation virtuelle d'un objet physique ou d'un système qui permet une surveillance, une analyse et une simulation en temps réel pour améliorer

ses performances et sa maintenance - voir section 3.3.2.5). Cela implique de s'assurer que les MMs sont équipés pour participer efficacement aux simulations, un aspect clé abordé dans la Q2. De plus, l'application des technologies d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique peut être exploitée pour améliorer l'analyse en temps réel et la compréhension des informations, renforçant ainsi la capacité prédictive du système.

La Q1 et la Q2 se penchent toutes deux sur le rôle des MMs dans l'avancement des capacités prédictives du système. En exploitant leurs capacités de collecte de données et en les intégrant dans les processus de simulation et d'analyse, les MMs contribuent à une meilleure prédiction des événements futurs. De plus, l'intégration des MMs avec des technologies avancées permet une analyse en temps réel et donne au système le pouvoir de prendre des décisions éclairées basées sur des prévisions prédictives. En tenant compte de ces aspects lors de l'intégration des MMs, les organisations peuvent améliorer leurs capacités prédictives, permettant des mesures proactives pour faire face aux défis potentiels et améliorer la performance globale du système.

Adaptabilité

Q1 : De quelles manières les MMs peuvent-ils améliorer le niveau d'autonomie au sein du système ?

Q2 : Comment les MMs peuvent-ils être intégrés efficacement pour permettre une fonctionnalité autonome ?

L'étape finale de développement vise à établir un système de prise de décision automatique capable de fournir des réponses auto-optimisantes et autonomes. La Q1 se concentre sur l'exploration des manières dont les MMs peuvent contribuer à augmenter l'autonomie globale du système. Une solution potentielle implique de remplacer certaines opérations manuelles nécessitant une intervention humaine, telles que l'appui sur un bouton, par les capacités d'un MM. En confiant cette tâche à un MM, le système devient moins dépendant des opérateurs humains physiques pour de telles actions, améliorant ainsi l'autonomie.

Pour atteindre l'auto-optimisation et l'autonomie, une solution dynamique qui prend en compte divers facteurs et identifie la meilleure ligne de conduite basée sur les prédictions dérivées des simulations est nécessaire. L'intégration des MMs joue un rôle crucial dans la facilitation de ce comportement auto-optimisant, s'alignant sur les considérations posées dans la Q2. Pour permettre une fonctionnalité autonome, une intégration soignée des MMs dans le système est nécessaire, en tenant compte de

leurs capacités, de leur communication avec d'autres composants et de leur capacité à s'adapter à des circonstances changeantes.

La Q1 et la Q2 abordent toutes deux le rôle des MMs dans l'avancement de l'autonomie du système. En exploitant les capacités des MMs et en leur assignant des tâches qui étaient précédemment effectuées par des opérateurs humains, le système devient plus autonome. De plus, en intégrant efficacement les MMs et en tenant compte de leurs capacités à s'adapter et à optimiser les opérations basées sur des simulations prédictives, les organisations peuvent faciliter la réalisation d'une fonctionnalité autonome. Cette intégration permet au système de prendre des décisions éclairées et d'agir de manière indépendante, améliorant ainsi son autonomie globale.

B.11 Phase II : Préparation de l'infrastructure

Avant d'introduire des MMs dans l'environnement de production, il est essentiel d'évaluer minutieusement le paysage actuel. La phase II assume ce rôle crucial. La sous-phase initiale "Étude préalable" agit comme un outil de diagnostic, évaluant soigneusement l'infrastructure actuelle pour identifier les domaines qui pourraient nécessiter une amélioration. Avec ces informations détaillées en main, la sous-phase suivante, "Modification de l'infrastructure et sélection des MMs", peut être mise en action. Cette section décrit les changements d'infrastructure nécessaires, menant à la sélection soignée des MMs qui s'intègrent facilement dans l'environnement révisé. Construire une infrastructure bien préparée pour l'intégration des MMs est l'objectif principal de cette phase.

B.12 Phase II-I : Étude préalable

Une fois que les besoins ont été analysés et les applications appropriées des MMs identifiées, il devient impératif d'évaluer et de vérifier l'infrastructure existante du système de production. Cela initie la phase suivante connue sous le nom d'étude préalable de l'infrastructure. Durant cette étape, une évaluation complète du système est menée sous plusieurs perspectives, ce qui peut être facilité par l'utilisation d'un questionnaire structuré applicable à divers systèmes. Ce questionnaire englobe plusieurs sections essentielles, des **prérequis généraux** du système tels que l'évaluation de la zone de travail et de ses attributs physiques, l'évaluation des pratiques de gestion, l'évaluation des stratégies de planification de la production et la considération globale des aspects de sécurité, aux **prérequis**

basés sur les principes fondamentaux de l'industrie 4.0 tels que l'interopérabilité et l'interconnectivité, l'examen de l'infrastructure de communication et de réseau, l'analyse des mesures de cybersécurité, l'exploration des techniques de virtualisation, la modularité et les architectures orientées service, ainsi que la décentralisation et les capacités en temps réel.

B.12.1 Prérequis généraux

B.12.1.1 Zone de travail et évaluation physique

Segmentation de la zone de travail

Initialement, l'hypothèse est que les principaux segments du fabricant peuvent être catégorisés en trois sections distinctes : l'entrepôt, l'atelier et la section de distribution. Notre objectif principal est d'évaluer si le fabricant a alloué des espaces séparés et désignés pour chacune de ces sections au sein de son établissement. Cela garantit que chaque section fonctionne de manière efficace et efficiente sans chevauchement ni interférence.

Au sein de chacune de ces sections, un examen approfondi est mené pour identifier les tâches et activités spécifiques que les MMs peuvent efficacement entreprendre. Par exemple, dans le département de distribution, les MMs peuvent être utilisés pour des tâches telles que l'emballage, garantissant que les produits sont correctement préparés pour l'expédition et adhèrent aux exigences d'emballage spécifiques. De même, dans les sections de l'entrepôt et de l'atelier, les MMs peuvent jouer un rôle crucial dans la facilitation d'inspections de qualité appropriées, contribuant au processus global d'assurance qualité.

En outre, enquêter sur laquelle de ces sections bénéficierait le plus d'un soutien logistique amélioré est l'étape suivante. En analysant de près les besoins logistiques des sections de l'entrepôt et de la distribution, il peut être déterminé si les MMs peuvent aider à rationaliser le transfert de matériaux et de produits entre ces départements. L'objectif est d'identifier tout goulot d'étranglement potentiel ou inefficacité dans le flux logistique et d'exploiter les capacités des MMs pour optimiser le processus de transfert, améliorant ainsi l'efficacité opérationnelle globale.

En évaluant soigneusement l'allocation spatiale, en identifiant les activités appropriées pour les MMs et en considérant les besoins logistiques des différentes sections, l'intégration des MMs est assurée de s'aligner de manière transparente sur les besoins spécifiques et les opérations de chaque département

au sein de l'installation du fabricant. Cette évaluation complète nous permet d'exploiter pleinement le potentiel des MMs, améliorant la productivité, le contrôle de la qualité et l'efficacité logistique dans l'ensemble du système de production.

L'inventaire est catégorisé en quatre catégories principales : matières premières, pièces inachevées ou inventaire de travail en cours (WIP), pièces défectueuses et produits finis. Comprendre la composition et la distribution de ces catégories d'inventaire est crucial car les MMs offrent des capacités précieuses dans le tri, le déplacement et le transfert de matériaux entre ces inventaires et différentes unités de fabrication. L'utilisation et la fréquence de chaque inventaire varient selon les différents systèmes et configurations de fabrication. Acquérir des connaissances sur le nombre et l'agencement des entrepôts et leurs méthodes de stockage est essentiel pour identifier toute limitation et déterminer les fonctions optimales pour les MMs. Généralement, les entrepôts sont situés à l'extérieur de l'environnement de production, offrant une opportunité d'exploiter les MMs pour les opérations internes de l'entrepôt et le transfert transparent d'articles entre l'entrepôt et l'environnement de production. Cela permet une meilleure gestion des stocks et un contrôle amélioré du flux de matériaux. Pendant le processus de production, il y a souvent un tampon de WIP qui pose des défis pour la planification et l'ordonnancement de la production. Les MMs peuvent jouer un rôle significatif pour relever ces défis en aidant le système à gérer et à optimiser le flux de WIP. Ils peuvent contribuer à des tâches telles que l'organisation et le repositionnement de l'inventaire WIP, garantissant une utilisation efficace des ressources et facilitant des transitions fluides entre les étapes de fabrication. En comprenant les catégories d'inventaire distinctes et leurs modèles d'utilisation respectifs, ainsi que les limitations et opportunités potentielles pour l'intégration des MMs, les capacités des MMs peuvent être employées efficacement pour améliorer la gestion des stocks, optimiser les processus de production et améliorer l'efficacité opérationnelle globale. Les MMs agissent comme des outils précieux pour rationaliser les opérations de manutention des matériaux, réduire les goulots d'étranglement et améliorer la flexibilité et l'agilité du système de fabrication.

Caractéristiques de l'environnement de travail

Disposition et mesure de la zone

L'intégration réussie de manipulateurs mobiles (MM) dans des environnements industriels nécessite une évaluation minutieuse de l'espace disponible, la prise en compte de différentes configurations de disposition et approches technologiques, ainsi que l'identification des tâches appropriées en fonction

de l'agencement et des exigences de déplacement. En respectant ces principes et en tenant compte de considérations plus larges, les MM peuvent contribuer efficacement à l'amélioration des processus de fabrication, de la productivité et de l'efficacité opérationnelle globale. Une considération fondamentale est la mesure dimensionnelle des espaces pouvant être utilisés efficacement par les MM. Cela implique d'évaluer l'agencement des machines et équipements au sein de l'installation de fabrication et d'évaluer l'espace disponible entre eux.

Différentes usines adoptent diverses configurations de disposition en fonction de facteurs tels que le type de produit, le volume de production et les processus de fabrication. Les types de disposition courants comprennent l'atelier à flux continu, l'atelier à commandes individuelles, la disposition de production fixe et la Technologie de Groupe (TG). La TG, en particulier, nécessite la mise en œuvre d'outils et de méthodologies spécifiques pour optimiser les opérations. Des exemples de ces outils incluent les Systèmes de Fabrication Cellulaire (SFC), les Systèmes de Fabrication Flexibles (SFF), la Production Lean et la Production Agile. Chaque disposition, couplée à sa technologie correspondante, présente des opportunités uniques pour l'application des MM.

En analysant attentivement la disposition et les considérations spatiales, il devient possible d'identifier les domaines où les MM peuvent contribuer efficacement, tels que la manutention des matériaux, le transport, l'assemblage et d'autres tâches connexes. La sélection et la configuration des MM doivent être alignées avec les exigences spécifiques de disposition et de technologie de l'environnement de fabrication, garantissant une utilisation optimale de ces dispositifs mobiles[141].

Au-delà des aspects liés à la technologie de production et aux machines, un autre facteur critique qui influence significativement la sélection d'un MM approprié est l'environnement de travail dans lequel il opérera. Diverses conditions environnementales doivent être prises en compte pour garantir une performance optimale du MM et sa compatibilité. Par exemple, la douceur ou la rugosité de la surface sur laquelle le MM se déplacera peut affecter sa mobilité et sa stabilité. De plus, déterminer si le MM fonctionnera principalement à l'intérieur ou à l'extérieur est crucial, car les environnements extérieurs peuvent exposer le MM à différentes conditions météorologiques et obstacles potentiels. De plus, la présence d'une exigence de salle blanche dicte davantage les spécifications et la convenance du MM pour l'environnement désigné.

Caractéristiques des objets

Comprendre les caractéristiques des pièces destinées à être manipulées par les manipulateurs mobiles (MM) est d'une importance significative dans le processus de sélection. Plusieurs aspects clés, tels que la forme géométrique, les dimensions et le poids des pièces, jouent un rôle central dans la détermination de l'effecteur final approprié pour le MM. En tenant compte de ces facteurs, il devient possible de garantir que le MM choisi est équipé des capacités nécessaires pour répondre aux exigences spécifiques des tâches à accomplir.

La forme géométrique des pièces influence la conception et la configuration de l'effecteur final, car elle affecte directement la stratégie de préhension ou de manipulation employée par le MM. Les pièces de formes irrégulières ou complexes peuvent nécessiter des pinces spécialisées ou des accessoires pour permettre une manipulation efficace. De même, les dimensions des pièces déterminent la portée et la dextérité requises du MM pour accéder et manipuler les pièces dans l'espace de production. En analysant attentivement la taille des pièces, il devient possible d'identifier le MM optimal avec la portée et l'amplitude de mouvement appropriées.

De plus, la considération du poids des pièces est cruciale pour déterminer la capacité de charge maximale que le MM devrait posséder. Ce paramètre garantit que le MM est capable de manipuler les charges spécifiées de manière sûre et efficace sans compromettre sa stabilité ou ses performances. En évaluant le poids des pièces, il devient possible de le comparer à la capacité de charge maximale du MM, assurant ainsi un environnement de travail adapté et sûr.

B.12.1.2 Plan de production

Pour un système de production existant, l'intégration de MMs nécessite une compréhension approfondie du plan de production intégré et de la planification des opérations. Cet aspect crucial souligne le besoin d'une étude et d'une préparation minutieuses dans ce domaine. Dans un système de production actif, toutes les activités sont intrinsèquement interconnectées, guidées par une chronologie précise et caractérisées par des rôles et responsabilités bien définis pour chaque composant. Ainsi, l'introduction de nouvelles opérations impliquant des MMs dans le planning de production, ou la substitution de machines ou de personnel existants par des MMs, nécessite une compréhension approfondie du plan de production actuel tout en envisageant les exigences de programmation futures.

L'intégration efficace de MMs dans le système de production nécessite des informations précieuses dérivées de la boucle de retour du plan de production. Ce retour permet d'identifier les domaines

potentiels d'amélioration au sein des processus existants, qui peuvent être abordés grâce à l'intégration de MMs. Par conséquent, une compréhension approfondie du dernier plan de production, combinée à une approche prospective, ouvre la voie à l'exploitation des capacités des MMs pour améliorer et optimiser diverses opérations. En reconnaissant la disposition et le plan de production, il devient possible de discerner le flux de matériaux au sein du système. C'est à ce stade que les MMs peuvent jouer un rôle crucial, en particulier pour faciliter les activités logistiques entre les différentes opérations.

Une étude approfondie de ces flux de matériaux, couplée à la création d'une représentation schématique, offre un outil analytique précieux pour identifier les emplacements optimaux pour les MMs au sein du système de production. En analysant et visualisant attentivement les flux de matériaux, les goulets d'étranglement potentiels ou les inefficacités peuvent être identifiés, conduisant à des décisions éclairées concernant l'emplacement et l'utilisation des MMs. Cette analyse contribue à identifier les domaines où les MMs peuvent rationaliser les processus de manutention des matériaux, optimiser l'allocation des ressources et améliorer l'efficacité opérationnelle globale.

Avoir une compréhension claire de quand utiliser les MMs est essentiel pour déterminer les besoins en batteries pour leur fonctionnement pendant chaque poste de travail. Cette connaissance joue un rôle crucial dans la sélection du type et de la quantité appropriés de MMs nécessaires pour chaque système de production spécifique. En évaluant les modèles d'utilisation et les postes de travail dans l'environnement de production, il devient possible d'estimer la durée et l'intensité de l'utilisation des MMs tout au long de la journée. Ces informations aident à déterminer la capacité de batterie nécessaire pour maintenir le niveau de fonctionnalité désiré des MMs pendant les heures de fonctionnement. Par exemple, si le système de production fonctionne sur plusieurs postes ou connaît des heures de travail prolongées, les MMs peuvent nécessiter des batteries plus grandes ou multiples pour garantir un fonctionnement ininterrompu pendant les périodes de temps désignées. De plus, la compréhension des tâches spécifiques et des activités dans lesquelles les MMs seront impliqués permet une évaluation plus précise de leur consommation de batterie. Différentes tâches peuvent varier en termes de demandes énergétiques, en fonction de facteurs tels que la complexité de la manipulation, la distance parcourue et l'utilisation de capteurs ou d'outils supplémentaires. En comprenant les exigences de chaque tâche, il devient possible d'estimer la durée de vie de la batterie nécessaire pour un achèvement réussi.

B.12.1.3 Considérations managériales

Pour acquérir une compréhension approfondie de l'infrastructure du système de production existant, il est essentiel de plonger dans diverses considérations managériales. Ces considérations englobent des aspects vitaux tels que le contrôle du système, la supervision et l'état futur envisagé du système de production. L'acquisition de ces connaissances devient cruciale pour l'intégration transparente des MMs et assurer leur mise en œuvre réussie dans l'environnement de production.

L'une des principales considérations managériales implique de déterminer comment le système de production existant est contrôlé et supervisé. Cela implique d'examiner les mécanismes actuels en place pour superviser et coordonner les activités des différents composants du système. Comprendre la hiérarchie de contrôle, les processus de prise de décision et les protocoles de communication permet une approche plus informée pour intégrer les MMs. En alignant les fonctionnalités des MMs avec le cadre de contrôle existant, une intégration harmonieuse peut être réalisée, évitant les conflits ou les perturbations dans le processus de production global.

De plus, avoir une perspective orientée vers l'avenir pour le système de production est crucial dans l'intégration des MMs. Cela implique d'envisager l'état souhaité du système de production et d'identifier les objectifs stratégiques à atteindre. En alignant l'intégration des MMs avec la vision future, les fabricants peuvent s'assurer que la mise en œuvre des MMs contribue au succès à long terme du système de production. Cela peut impliquer de prendre en compte des facteurs tels que la scalabilité, la flexibilité, l'adaptabilité et le potentiel pour des avancées futures dans la technologie.

En outre, comprendre les considérations managériales fournit des informations précieuses sur les implications plus larges de l'intégration des MMs dans le système de production. Cela permet aux fabricants d'évaluer l'impact sur la gestion de la main-d'œuvre, l'allocation des ressources, les besoins en compétences et les besoins en formation. De plus, cela facilite l'identification des défis et des risques potentiels associés au processus d'intégration, permettant d'élaborer des stratégies d'atténuation proactives.

De plus, considérer les aspects managériaux permet d'explorer les opportunités d'optimisation des processus et d'amélioration continue. En alignant l'intégration des MMs avec les systèmes de gestion existants, les fabricants peuvent tirer parti des capacités des MMs pour améliorer la productivité, la qualité et l'efficacité. Cela peut impliquer de réévaluer et de redéfinir les procédures opérationnelles

standard, de rationaliser les flux de travail et de réaffecter les tâches pour exploiter les forces des MMs dans l'exécution d'activités répétitives, intensives en main-d'œuvre ou dangereuses.

B.12.2 Prérequis basés sur les principes de l'Industrie 4.0

B.12.2.1 Décentralisation et décisions autonomes

Dans la planification et le contrôle de la production centralisés, toute l'autorité décisionnelle est concentrée dans une unité de contrôle centrale. Cette unité assume la responsabilité de planifier et de programmer différents ordres de production, qui sont ensuite transmis aux machines pour exécution [142]. Des architectures hiérarchiques sont utilisées pour les systèmes centralisés afin de collecter toutes les données à partir d'une seule source, facilitant ainsi l'optimisation globale. La planification et le contrôle de la production centralisés ont des limitations lorsqu'il s'agit de gérer des situations dynamiques [143]. Cela peut entraîner des écarts importants par rapport au plan initial, nécessitant une replanification complète. Puisque la prise de décision est centralisée, les machines individuelles manquent de capacité à apporter des corrections immédiates. De plus, les données de planification peuvent devenir obsolètes au fur et à mesure qu'elles se déplacent à travers les niveaux hiérarchiques. En conséquence, les systèmes de production centralisés sont inflexibles et ont des limitations dans leur capacité d'adaptation aux changements.

La considération des systèmes décentralisés dans le contrôle de la production est le résultat de la nécessité de stratégies plus réactives et de boucles de rétroaction plus courtes. Contrairement aux approches centralisées, les techniques décentralisées transfèrent l'autorité décisionnelle aux divers composants du système de production, tels que les machines ou les produits, leur permettant d'agir de manière indépendante sans unité de contrôle central. Une communication efficace entre les composants est essentielle car ils doivent avoir accès aux données pertinentes pour que la prise de décision décentralisée puisse avoir lieu avec succès. Des conceptions hétéroarchiques sont souvent utilisées pour mettre en œuvre structurellement les techniques décentralisées. En raison de la portée limitée de chaque décision, les calculs nécessitent moins de traitement, ce qui réduit l'effort de calcul. Une replanification régulière dans les systèmes décentralisés améliore la qualité du contrôle de la production tout en augmentant l'exactitude et la transparence grâce à une collecte de données rapide au niveau de l'atelier. Cependant, puisqu'ils pourraient privilégier leurs propres objectifs, les composants séparés doivent se coordonner plus efficacement pour éviter de gêner l'optimisation globale du système.

Des techniques hybrides ont été développées pour combiner les avantages des approches centralisées et décentralisées. Ainsi, les modèles hybrides intègrent à la fois l'autonomie au niveau de l'atelier et une certaine mesure de hiérarchie et de gestion top-down par une entité supérieure. L'approche hiérarchique directionnelle rigide en communication est supprimée. Cependant, les éléments ont une capacité limitée de pensée indépendante.

Pour favoriser la décentralisation dans l'intégration des MMs, les considérations suivantes doivent être prises en compte : La distribution de l'autorité de contrôle et de décision dans l'ensemble du système est l'un des facteurs les plus importants [144]. Le niveau d'indépendance et de capacités de prise de décision du MM lui-même, la capacité à s'adapter et à agir indépendamment dans des paramètres définis et sans contrôle central fixe doivent également être évalués. Établir un système de partage des connaissances avec une communication adéquate avec d'autres agents et composants du système est nécessaire pour échanger des informations et coordonner les opérations. Faciliter la prise de décision locale et minimiser le besoin de traitement centralisé des données, accroît la vitesse de traitement et d'analyse des données, et fournit la capacité de traiter les données en temps réel. L'attention portée à la position des employés pour participer aux processus de prise de décision décentralisés liés aux MMs est également importante. Des programmes de formation et le développement de compétences nécessaires sont nécessaires pour garantir que les employés aient les connaissances et les capacités de prendre des décisions éclairées. Pour une intégration décentralisée, les allocations de tâches et de ressources doivent également être décentralisées.

B.12.2.2 Interopérabilité et interconnectivité

L'interopérabilité fait référence à la capacité de différents composants ou équipements à se connecter et à partager des informations significatives les uns avec les autres. Des protocoles de communication standardisés, des formats de données et des structures de commandes sont nécessaires pour un échange de données transparent entre différents composants. S'assurer que les MMs et autres CPS prennent en charge des protocoles de communication communs tels que OPC UA, MQTT, etc., et en général, la compatibilité avec l'ensemble du système existant et d'autres composants est une étape vitale. Le potentiel d'interopérabilité du système augmente avec l'adhésion aux normes de l'industrie telles que l'ISO, l'IEEE, etc., qui aide également à transférer les données de la manière la plus efficace. Évaluer les forces et les faiblesses de l'informatique, de la communication et des architectures réseau au sein du

système de production est une analyse clé du système. Cette évaluation comprend l'identification de l'équipement ou des systèmes nécessaires à l'intégration du MM, la compréhension des protocoles de communication pris en charge dans l'entreprise, et la détermination de la stabilité et de la couverture du réseau Wi-Fi dans toute l'installation. Ces considérations sont particulièrement critiques pour le fonctionnement réussi d'équipements mobiles comme les MMs, car ils dépendent fortement d'un réseau sans fil fiable et adapté.

Lors de la discussion de la communication et de l'infrastructure réseau, englobe tous les composants du système, allant des machines et des capteurs aux opérateurs humains. Reconnaître que les humains sont des composants intégraux du système de production nous permet de considérer leurs besoins spécifiques en matière de communication et d'interaction. Comprendre les connaissances et l'expertise des opérateurs humains, ainsi que la nature de leurs activités et le niveau de communication requis, nous permet de concevoir l'interface la plus optimale et de développer des techniques de programmation appropriées pour faciliter une communication efficace entre les humains et les MMs.

De plus, il est essentiel d'évaluer la stabilité et la couverture du réseau Wi-Fi dans l'environnement de production. Étant donné la mobilité des MMs, un réseau sans fil stable et robuste est vital pour une communication sans faille et un contrôle. Évaluer la fiabilité et l'étendue de la couverture Wi-Fi aide à identifier les éventuelles lacunes ou les zones de faible signal. En abordant ces problèmes, tels que le déploiement de points d'accès supplémentaires ou l'optimisation de la configuration du réseau, une connectivité ininterrompue pour les MMs et un support pour leur fonctionnement efficace au sein du système de production peuvent être assurés. D'autre part, d'autres émetteurs de données sans fil comme les réseaux 5G [145] conçus pour une zone plus large et une gamme plus large de fréquences pourraient offrir des vitesses plus élevées et une latence plus faible par rapport à de nombreux réseaux Wi-Fi actuels. Combiner la technologie 5G et un réseau Wi-Fi pour augmenter la distance de couverture dans les environnements industriels est étudié par M. Khadmaoui-Bichouna et al, [146].

B.12.2.3 Modularité

Une approche de conception basée sur les composants est la base pour atteindre la modularité. En décomposant le système en modules distincts qui peuvent être développés, testés et maintenus indépendamment, l'entreprise peut améliorer la flexibilité et l'adaptabilité[147]. Les interfaces standardisées et leur compatibilité avec d'autres modules et CPS sont le facteur vital suivant. L'idée de modularité est

de définir les modules qui sont évolutifs pour une configuration flexible et peuvent être facilement remplacés ou mis à niveau sans perturbations majeures du système entier [148]. Comme le terme capacité plug-and-play qui fait référence à la connexion, la configuration et la reconfiguration des modules sans temps d'arrêt significatif ni modification du système entier [149]. Par exemple, pour la maintenance et la réparation des modules, ils doivent être accessibles, remplaçables et capables d'être entretenus sans affecter la performance du système global. Chaque module devrait bénéficier d'un contrôle local tout en préservant la coordination du système dans son ensemble grâce à des interfaces et des protocoles de communication définis. La compatibilité avec le système existant, et les protocoles de communication standardisés ainsi que la vérification de la fonctionnalité de chaque module seul et en collaboration avec d'autres composants sont les aspects suivants importants.

B.12.2.4 Capacité en temps réel

Afin de réaliser l'intégration des MMs avec des capacités en temps réel, la première importance est l'intégration des capteurs et la perception. Les types appropriés de capteurs nécessaires pour les MMs et autres CPS et l'environnement capables d'échanger des données pertinentes en temps réel est la première étape [150]. Mettre en œuvre des systèmes d'acquisition de données à haute vitesse et des protocoles de communication pour transmettre des données du MM au système de contrôle central (MES) et à d'autres composants. En plus de la vitesse, la fiabilité et la robustesse des infrastructures de communication sont importantes pour gérer le volume et la vitesse des données générées par les MMs en temps réel. La capacité en temps réel ne se réfère pas seulement à transférer rapidement des données, mais aussi à les traiter et les analyser efficacement. Des algorithmes et des outils logiciels doivent être installés pour obtenir des informations utiles à partir des données produites par les MMs. Les données et les analyses pourraient être affichées sous forme de tableau de bord permettant un suivi en temps réel des indicateurs de performance clés (KPI) et de toute autre information requise de manière graphique. Ensuite, il est important de mettre en place une infrastructure de stockage de données capable de gérer et de stocker de grands volumes de données en temps réel générées par les MMs. des bases de données ou des systèmes de gestion de données conçus pour stocker des données en temps réel tout en les historisant pour des analyses et une détection de tendances ultérieures sont utiles. L'intégration des capacités en temps réel des MMs dans des systèmes de contrôle centralisés tels que MES et ERP aide à soutenir la prise de décision, la planification ou l'allocation des ressources en temps

réel. Grâce à ce suivi, les performances en temps réel du MM pourraient également être accessibles, ce qui est un avantage pour alerter le système sur les dysfonctionnements, les besoins de maintenance ou tout événement inattendu. La mise en place de mesures de sécurité robustes pour protéger les données en temps réel générées par les MMs contre l'accès ou la manipulation non autorisés est une considération vitale. Dans le cadre du processus de pré-étude, il est crucial de revoir soigneusement l'infrastructure de protection existante du système avant d'intégrer un nouveau MM. Cette évaluation implique d'examiner divers aspects, notamment le cadre de sécurité global du système, les risques et vulnérabilités potentiels, et le lieu et la méthode de stockage des données. En particulier, dans le cas des MMs, une attention particulière doit être accordée à l'infrastructure de réseau Wi-Fi global et local, car elle joue un rôle significatif dans la facilitation d'une communication et d'un transfert de données transparents. En tenant compte de ces facteurs, les organisations peuvent aborder de manière proactive les préoccupations en matière de cybersécurité et atténuer les risques potentiels associés à l'intégration des MMs, garantissant ainsi le fonctionnement sûr et sécurisé du système de production à l'ère de l'Industrie 4.0. L'approche informatique de pointe a également développé des infrastructures à haute vitesse qui offrent des capacités en temps réel qui peuvent être prises en compte.

B.12.2.5 Virtualisation

Pour l'intégration des MMs dans un système existant virtualisé, la compatibilité du MM avec la plateforme de virtualisation ainsi que les exigences matérielles et logicielles doivent être évaluées. Les pilotes nécessaires doivent être installés et les ressources nécessaires doivent être attribuées aux MMs, telles que des cœurs de processeur ou de l'espace disque. Le réseau virtuel du MM doit également être défini et configuré en cas d'ajout de routeurs ou de commutateurs, le représentant virtuel de ceux-ci doit être créé. L'état actuel et le niveau de l'environnement virtuel du système de fabrication doivent être identifiés ainsi que les principaux objectifs du système virtuel. Différents niveaux d'environnement virtualisé pourraient être classés en modèle numérique, ombre numérique et jumeau numérique. La définition d'un modèle numérique est une représentation numérique d'un objet physique existant ou planifié ; un modèle numérique ne doit pas échanger automatiquement des données avec son homologue réel. Cela indique que lorsque le modèle numérique est généré, tout changement apporté au système réel n'a aucun impact sur le modèle numérique et vice versa. Des simulations peuvent être effectuées au sein d'un modèle numérique. L'ombre numérique, en revanche, prend en charge un flux de données

automatique à sens unique des objets physiques vers le numérique. Ainsi, en cas de changement du système physique, l'ombre numérique changerait également. Cependant, le flux inverse n'existe pas automatiquement à ce niveau. Enfin, un jumeau numérique fournit des flux de données dans les deux sens, offrant la possibilité de surveiller et de contrôler le système en temps réel.

B.12.2.6 Orientation vers le service

L'implémentation de l'architecture orientée service (SOA) est désormais une approche établie pour aider les entreprises à obtenir des avantages considérables, tels qu'une agilité et une efficacité accrues, une meilleure utilisation des ressources existantes, plus de flexibilité et une meilleure préparation à réagir aux évolutions du marché. Dans cette approche, des services individuels sont définis qui peuvent être développés, déployés et maintenus indépendamment. Pour une intégration orientée service des MMs dans les systèmes de production, identifier les services que les MMs peuvent fournir au sein du système de fabrication est la première étape. Les services doivent être conçus pour être réutilisables pour être utilisés dans plusieurs processus. La compatibilité des services et la capacité à être mis à jour, remplacés ou modifiés en fonction des exigences de production changeantes sont également importantes. Ensuite, la découverte et l'enregistrement des services aident les autres services et composants à identifier et reconnaître les nouveaux services. Avec ce processus, les capacités, les objectifs et les emplacements des nouveaux services sont accessibles au système. Maintenant que les nouveaux services sont définis et identifiables au système, l'orchestration des services doit être activée pour coordonner l'exécution des services et gérer le flux de données entre eux. Différents services pourraient être rassemblés pour fournir les processus de production souhaités. Des protocoles de communication entre les services doivent être établis pour assurer une interaction et une collaboration fluides entre eux. La vérification des caractéristiques des services MM tels que la performance, la disponibilité, la fiabilité, l'évolutivité et la résilience est importante, ce qui est dans le contexte des accords de niveau de service (SLA) [151]. Cependant, un système de surveillance pour suivre ces caractéristiques devrait être mis en place ainsi qu'une source d'information en cas de défaillances. Pour les services MM, différents niveaux d'accès et de sécurité pourraient être définis en cas de données sensibles.

B.13 Phase II-II : Modification de l'infrastructure et sélection de MM

En fonction de l'analyse des caractéristiques du système de production existant, tel que proposé dans la phase II-I, les modifications nécessaires au système peuvent être réalisées, et le MM le plus adapté peut être sélectionné pour s'adapter à la zone physique et aux besoins du système.

L'intégration réussie d'un MM dans un système existant dans le contexte de l'Industrie 4.0 nécessite souvent une série de modifications pour assurer la compatibilité et la préparation. Cette section se concentre sur la description des modifications clés nécessaires pour préparer le système existant à l'intégration transparente d'un MM. Les modifications englobent divers aspects, notamment l'infrastructure de communication, l'intégration de capteurs, les améliorations de sécurité, la gestion de l'énergie, les logiciels de contrôle et d'intégration, l'adaptation de l'espace de travail, les flux de travail et la planification des tâches, ainsi que la formation et le développement des compétences. L'infrastructure de communication doit être évaluée et améliorée pour soutenir un échange de données efficace entre le MM et les autres composants du système, en intégrant des protocoles et des normes de communication adaptés. De plus, l'intégration de capteurs appropriés permet au MM de percevoir et de réagir à son environnement de manière efficace. Les améliorations de sécurité consistent à mettre en œuvre des mesures pour assurer la coexistence des opérateurs humains et du MM, y compris des barrières de sécurité, des systèmes d'arrêt d'urgence et la conformité aux normes de sécurité des robots collaboratifs. Évaluer et aborder l'infrastructure d'alimentation garantit qu'elle peut répondre aux besoins énergétiques du MM, nécessitant éventuellement l'installation de prises de courant supplémentaires ou de stations de charge. Les systèmes de contrôle existants et l'architecture logicielle doivent être analysés pour assurer la compatibilité et permettre une intégration transparente. L'adaptation de l'espace de travail peut impliquer la réorganisation de l'équipement et la modification des postes de travail pour répondre aux besoins opérationnels du MM. L'optimisation des flux de travail et des procédures de planification des tâches garantit une allocation efficace des tâches entre les opérateurs humains et le MM. Enfin, la fourniture de programmes de formation appropriés facilite la compétence des opérateurs et du personnel de maintenance dans l'exploitation, la programmation et la maintenance du système MM intégré. En examinant minutieusement et en mettant en œuvre ces modifications, le système existant peut être correctement préparé et rendu prêt pour l'intégration d'un MM dans le contexte de l'Industrie 4.0, favorisant une productivité améliorée et une efficacité opérationnelle.

Cette analyse peut aider à caractériser le MM approprié et englober des aspects tels que la capacité de charge maximale, qui détermine les limitations de poids que le MM doit être capable de manipuler. La sélection de l'effecteur final est une autre considération importante, car elle dicte le type d'outil ou de préhenseur nécessaire pour une manipulation efficace dans le système de production. La portée maximale requise définit l'étendue spatiale que le MM doit couvrir, garantissant qu'il peut accéder et opérer dans les zones souhaitées. Les degrés de liberté (DoF) requis font référence à la plage spécifique et aux types de mouvements nécessaires pour effectuer des tâches avec précision et efficacité. Le système de vision et les capteurs jouent un rôle vital en fournissant une perception et une conscience environnementale au MM. La vitesse requise reflète le rythme opérationnel souhaité dans le système de production, influençant la sélection d'un MM capable de répondre à ces exigences de vitesse. Le type de mobilité requis prend en compte des facteurs tels que le plan d'étage et les contraintes opérationnelles, déterminant les capacités de mobilité appropriées du MM. Les exigences de niveau de précision abordent la précision nécessaire pour des tâches telles que la précision de positionnement et la répétabilité. Enfin, la capacité de la batterie est une considération cruciale pour assurer un fonctionnement ininterrompu et une alimentation électrique suffisante pour le MM. En analysant attentivement et en comprenant ces facteurs, le processus d'intégration peut identifier et sélectionner le MM le plus adapté aux besoins spécifiques et aux caractéristiques du système de production existant.

B.14 Phase III : Intégration

Cette phase vise à intégrer les MMs aussi efficacement que possible en utilisant les informations complètes et mures obtenues dans les phases précédentes. La méthode d'intégration complète est séparée en quatre catégories : Intégration physique, Intégration de la communication, Intégration fonctionnelle et opérationnelle, et Intégration numérique. Dans cette section, différentes catégories et différentes couches sont présentées.

B.14.1 Types d'intégration

B.14.1.1 Intégration physique

Au cœur de l'intégration physique se trouve la garantie que les MMs peuvent naviguer efficacement dans les complexités uniques d'un espace de travail désigné. Bien que les MMs soient prééquipés de

capacités de navigation, les introduire dans un nouvel environnement nécessite souvent un étalonnage et un réglage fins. Ce processus implique la cartographie de l'environnement industriel et la transmission de ces informations au MM, optimisant ses algorithmes de planification de trajet. Un tel étalonnage peut inclure la définition de zones de contrôle de vitesse dans des zones plus sensibles, telles que près de machines lourdes ou de postes exploités par des humains. Ces zones réduiraient automatiquement la vitesse du MM pour garantir la sécurité et la précision des opérations. D'autres ajustements pourraient inclure la mise en place de zones d'interdiction. Il s'agit de zones désignées que, pour diverses raisons - sécurité, logistique opérationnelle ou présence d'équipements délicats - le MM ne devrait pas traverser. Des exemples incluent des portes spécifiques destinées aux opérateurs humains, des zones avec une circulation piétonnière élevée ou des espaces avec des équipements potentiellement dangereux pour un MM.

De plus, l'alignement mécanique du MM avec les outils et équipements actuels est crucial. Il est essentiel que le MM s'engage de manière transparente avec ces composants, ce qui pourrait nécessiter des interfaces mécaniques spécialisées ou des adaptateurs. Conformément aux protocoles établis de sécurité des robots, les MMs doivent utiliser leurs capteurs pour évaluer constamment leur environnement, garantissant la sécurité, en particulier lorsqu'il y a une collaboration homme-robot. De plus, les implications ergonomiques de l'introduction des MMs ne peuvent être négligées. Leur incorporation devrait améliorer le lieu de travail pour les opérateurs humains, nécessitant une réflexion approfondie sur des éléments tels que le bruit opérationnel, la vitesse de déplacement et d'autres perturbations potentielles.

B.14.1.2 Intégration communicationnelle

Dans le domaine de l'Industrie 4.0, parvenir à une interaction fluide entre les appareils et les humains ne concerne pas seulement la technologie ; il s'agit également de choix stratégiques qui facilitent l'efficacité opérationnelle. L'intégration des MMs selon ce cadre nécessite une approche en trois volets, chacun se concentrant sur un aspect de la communication. Premièrement, il y a l'interaction entre le MM et les systèmes de contrôle de base qui régissent une configuration industrielle. Deuxièmement, il s'agit de la communication de pair à pair entre les MMs et d'autres machines, favorisant des réponses en temps réel et des opérations rationalisées. Enfin, au cœur de tout environnement de production se trouvent les humains qui manipulent ces outils, rendant l'interaction homme-robot indispensable.

Ensemble, ces trois facettes - le Système de Supervision et de Contrôle, le Système Multi-agent et la Collaboration Homme-Robot - forment l'épine dorsale de notre stratégie d'intégration communicationnelle.

Système de Supervision et de Contrôle

Chaque environnement de production s'appuie fortement sur son système de contrôle, qui prend les rênes pour orchestrer les tâches de planification et de gestion. Cela est dirigé par les données de commande des clients, assurant une utilisation optimale des ressources telles que le personnel, les matières premières et l'infrastructure. De manière prédominante, les industries exploitent un système de contrôle centralisé, orchestrant une symphonie de dispositifs interconnectés. La considération clé réside dans l'intégration des MMs. Les MMs possèdent leurs propres API, qui régissent à la fois leurs plates-formes mobiles et leurs bras. Une décision cruciale réside dans le choix de savoir si les MMs doivent fonctionner de manière autonome via leurs API ou s'ils doivent être connectés au système de contrôle central. Un compromis potentiel émerge également, un système hybride qui trouve un équilibre entre l'autonomie et la commande centrale. L'hypothèse suggère qu'une connexion directe de l'API au système de contrôle pourrait renforcer les performances et la flexibilité. Cependant, pour une adaptabilité optimale face à des plans de production variables, une programmation fondamentale et standardisée pour les MMs est indispensable.

Système multi-agents (MAS)

Dans cette couche, l'accent est mis sur la discernement des machines qui pourraient avoir besoin de communiquer directement avec le MM. Par exemple, un MM pourrait déposer une pièce à un endroit désigné. Cette action peut être directement perçue par un robot ultérieur, indiquant son tour pour effectuer sa tâche, ou par un autre MM signifiant une occupation d'espace. De telles interactions directes pourraient, dans des scénarios spécifiques, rationaliser les opérations, les rendant à la fois plus rapides et plus efficaces.

Collaboration homme-robot

L'évolution d'un environnement de production ne concerne pas uniquement les machines ; elle concerne également les humains qui les dirigent. À mesure que les MMs sont introduits, il est essentiel de créer des interfaces qui facilitent une communication homme-robot transparente sans compromettre la sécurité. De plus, le succès de cette intégration dépend de la compétence des opérateurs humains. Des

sessions de formation complètes doivent élucider les capacités et les contraintes des MMs, permettant aux opérateurs de tirer pleinement parti du potentiel du MM de manière sûre et efficace.

B.14.1.3 Intégration fonctionnelle et opérationnelle

Au-delà de simplement être présent et de communiquer, le MM doit exécuter ses tâches de manière transparente, que ce soit la prise, le placement, l'assemblage ou toute autre opération. Il doit également s'aligner avec les travailleurs humains, le cas échéant, sans causer de perturbations. La programmation efficace des MMs joue un rôle crucial pour exploiter pleinement leur potentiel. L'utilisation d'interfaces de programmation de haut niveau, rendue possible par les avancées en intelligence artificielle et en apprentissage automatique, permet une conception rapide des tâches et offre la flexibilité de modifications en temps réel. L'adoption de la paramétrisation des tâches garantit que les MMs peuvent s'adapter en fonction de variables changeantes plutôt que de fonctionner selon des schémas fixes. Une tendance émergente est que certains MMs peuvent apprendre des tâches en observant des humains ou d'autres robots, contournant la programmation manuelle intensive.

L'introduction et la mise en œuvre de tâches standardisées élèvent la flexibilité et l'efficacité opérationnelle des MMs. En décomposant des tâches complexes en composants plus simples et modulaires, les MMs peuvent gérer sans heurts une gamme diversifiée d'activités. Par exemple, avoir une bibliothèque de comportements standardisés, comme ramasser des objets ou suivre des trajets prédéfinis, accélère le déploiement ou la réaffectation d'un MM dans des environnements de production dynamiques. Essentiel à ce cadre est l'intégration de routines robustes de gestion des erreurs, garantissant que les MMs peuvent naviguer dans des scénarios inattendus, résolvant autonomement le défi ou signalant la nécessité d'assistance.

Un avantage tangible de telles tâches standardisées est l'interchangeabilité qu'elles offrent. Dans des scénarios où un MM est hors ligne pour maintenance ou dépannage, un autre peut prendre sa place sans effort, assurant des perturbations minimales. Cette transition est d'autant plus facilitée par l'adoption de protocoles de communication standardisés, favorisant une interaction transparente entre les MMs et d'autres dispositifs ou systèmes au sein du paysage de production. En fait, bien que l'efficacité d'un MM soit ancrée dans une programmation méticuleuse, c'est l'incorporation stratégique de tâches standardisées qui amplifie sa flexibilité et son adaptabilité dans divers scénarios de fabrication.

B.14.1.4 Intégration numérique

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, il est essentiel de garantir que le MM soit intégré dans le jumeau numérique, les plateformes d'analyse de données ou toute autre infrastructure numérique. Cela aidera à la surveillance en temps réel, à l'optimisation et à la prise de décision. L'Internet des objets (IoT) améliore encore l'intégration numérique. Avec des capteurs intégrés et des modules de communication, les MMs peuvent envoyer des flux continus de données, essentiels pour la prise de décision en temps réel, l'allocation adaptative des tâches et la maintenance prédictive. Ces données alimentent également le jumeau numérique, garantissant sa précision et sa pertinence.

De plus, l'intégration numérique facilite l'interopérabilité fluide des MMs avec d'autres systèmes numériques, tels que les systèmes d'exécution de la fabrication (MES) ou les systèmes de planification des ressources d'entreprise (ERP). Cela garantit que les tâches attribuées aux MMs sont synchronisées avec les objectifs plus larges de la fabrication et la gestion des stocks. Par exemple, si un système ERP indique une pénurie d'un composant particulier, un MM peut recevoir des instructions numériques pour prioriser les tâches liées à la production ou à l'assemblage de ce composant. Une autre dimension critique est l'intégration cloud. Le stockage et le traitement des données sur le cloud permettent des analyses avancées, une surveillance à distance et la possibilité de rapidement ajuster les opérations en fonction de la demande. Cela permet également le déploiement d'algorithmes d'IA avancés qui pourraient être intensifs en calcul, améliorant ainsi l'adaptabilité et les capacités de prise de décision des MMs.

Pour l'intégration numérique des MMs, les étapes suivantes sont proposées. 1. Définir clairement l'objectif des MMs dans le système. 2. Analyser les infrastructures existantes et leur organisation, y compris l'hyperviseur, les machines virtuelles, la configuration du réseau et les outils de gestion. Niveau de virtualisation et objectifs du système, plates-formes utilisées pour le développement de la virtualisation. Examiner en détail la plateforme de virtualisation utilisée ou envisagée pour l'intégration. Comprendre ses fonctionnalités, limites et les interfaces de programmation d'application ou kits de développement logiciel disponibles pour l'intégration des MMs. 3. Déterminer les objectifs du système virtuel existant et définir les objectifs d'intégration du MM dans l'environnement virtualisé. 4. Évaluer la compatibilité de la plateforme de virtualisation et du MM. Déterminer si les interfaces matérielles, les systèmes de contrôle et les protocoles de communication du MM sont compatibles avec

l'environnement virtualisé. Confirmer la disponibilité des composants logiciels et pilotes nécessaires. 5. Assurer la sécurité des connexions, des réseaux et des données. 6. Comblent le fossé entre les interfaces natives du MM et la plateforme de virtualisation. Faciliter la communication entre les MMs et le jumeau numérique en utilisant des protocoles de communication appropriés et des types et formats de données standard. Les algorithmes de contrôle nécessaires du bras robotique, les algorithmes de navigation du robot mobile et les algorithmes utilisés pour traiter et interpréter les données capturées par les capteurs du bras (par exemple, caméras, capteurs de profondeur) et les capteurs du robot mobile (par exemple, LIDAR, odométrie). Ces algorithmes peuvent inclure des techniques de détection, de reconnaissance, de suivi ou de cartographie environnementale. Ils aident à extraire des informations significatives des données des capteurs, permettant à la représentation virtuelle de percevoir et d'interagir avec l'environnement. 7. Coordination et intégration du contrôle des MMs sur la plateforme du jumeau numérique.

B.14.2 Types d'intégration et principes de l'Industrie 4.0 : Un cadre synergique pour la fabrication moderne

La figure B.33 explore la relation symbiotique entre différents types d'intégration et les principes fondamentaux de l'Industrie 4.0. Chaque type d'intégration interagit avec plusieurs principes de l'Industrie 4.0, contribuant collectivement à la nature dynamique et interconnectée de la fabrication moderne.

L'intégration physique témoigne du concept de modularité. Dans ce type d'intégration, les composants sont conçus pour être facilement ajoutés, retirés ou ajustés. Cette philosophie de conception permet aux fabricants de personnaliser rapidement leur environnement de production, s'adaptant sans effort aux demandes ou aux exigences changeantes.

D'autre part, l'intégration communicationnelle met en lumière le principe de l'interopérabilité. Ici, les systèmes, les appareils et les interfaces sont conçus pour communiquer de manière transparente, éliminant les barrières et assurant un échange cohérent de données. Cette communication transparente donne également naissance à la prise de décision décentralisée, où les appareils ou composants individuels interprètent les données de manière autonome. Une telle décentralisation leur permet de prendre des décisions locales rapides. De plus, l'essence de la capacité en temps réel est également enracinée dans l'intégration communicationnelle. Avec la puissance de la transmission instantanée de données,

l'ensemble du système de fabrication acquiert la capacité de fonctionner en fonction d'informations actuelles et en direct.

L'intégration fonctionnelle et opérationnelle apporte son propre ensemble de caractéristiques uniques. La modularité, une fois de plus, est un principe clé ici, car les tâches au sein de cette intégration sont segmentées en unités modulaires. Cela permet une réaffectation agile des tâches en réponse aux demandes évolutives de la fabrication. De plus, les mécanismes de rétroaction intrinsèques à cette intégration facilitent la transmission de données en temps réel, assurant des adaptations immédiates et une prise de décision éclairée. Un autre point fort significatif de l'intégration fonctionnelle et opérationnelle est son orientation service. Les MMs, par exemple, offrent des applications ou des fonctions spécialisées pouvant être invoquées et adaptées pour répondre à des besoins opérationnels spécifiques.

L'intégration numérique, pierre angulaire de l'évolution de la fabrication moderne, est profondément liée au principe de la virtualisation. Des entités telles que les jumeaux numériques illustrent ce principe. Ces homologues virtuels permettent des simulations approfondies, des prévisions et des processus de prise de décision sans perturber les opérations physiques réelles. Mais, tout comme les autres intégrations, l'intégration numérique n'est pas à l'abri du besoin d'interopérabilité. Différents systèmes logiciels, outils et plates-formes sont harmonisés pour interagir de manière transparente, assurant une chaîne ininterrompue d'échange de données. De plus, avec le soutien des ressources basées sur le cloud, l'intégration numérique possède l'aptitude à traiter les données en temps réel, traduisant les informations en actions promptes.

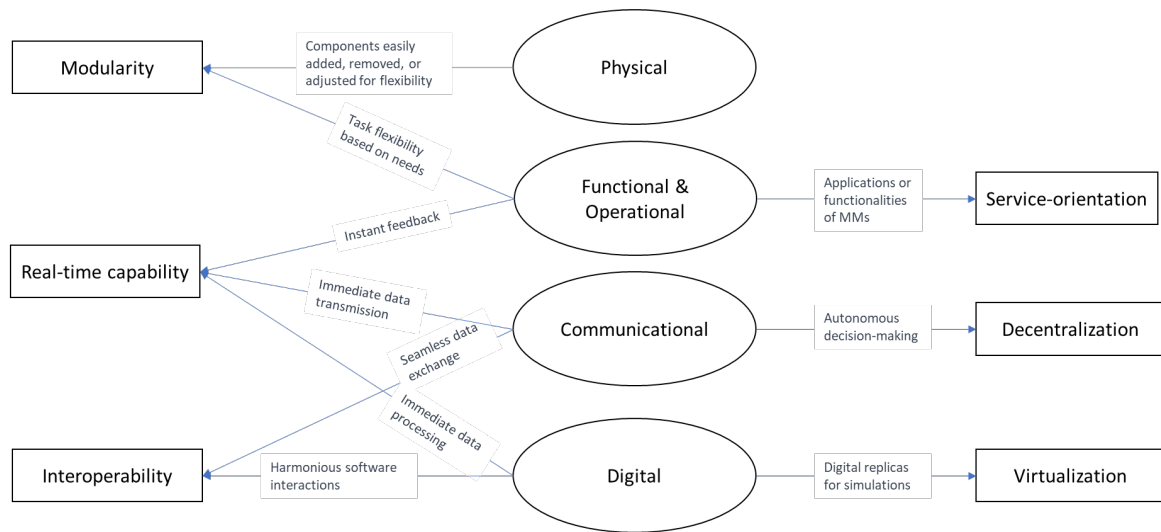


FIGURE B.33 – La relation symbiotique entre différents types d'intégration et les principes fondamentaux de l'Industrie 4.0

B.14.2.1 Une architecture modulaire orientée services avec une décentralisation adaptative basée sur l'interopérabilité en temps réel et les capacités virtuelles (MSOA)

En réponse aux lacunes des structures centralisées traditionnelles, notre architecture proposée intègre une conception modulaire orientée services offrant à la fois évolutivité et flexibilité. Cette flexibilité permet des ajustements en temps réel en réponse aux changements de production, tandis que la décentralisation adaptative intégrée garantit une prise de décision opportune et localisée tout en réduisant les goulots d'étranglement courants.

Pour une intégration modulaire des MMs, les définitions modulaires suivantes sont proposées. Tout d'abord, les modules matériels et logiciels des MMs devraient être définis de manière générale. Chaque MM contient une plateforme mobile, un bras robotique et un PLC. Cependant, le bras est généralement équipé d'un système d'outillage approprié et l'ensemble du système est doté de systèmes de vision et de perception tels que des caméras et des capteurs. Pour chacun de ces modules, un logiciel pourrait être assigné ou certains d'entre eux peuvent partager la même interface.

En plus des modules physiques, il est possible de définir des modules fonctionnels pour les MMs. Les modules fonctionnels d'un MM peuvent être catégorisés en communication, contrôle, perception et exécution de tâches. Chacun représente une étape différente de l'intégration. Ensuite, les interfaces et les interactions entre le système existant et le nouveau MM doivent être déterminées. Cela comprend

les structures de commande, les formats de données et les protocoles de communication nécessaires pour une interaction efficace. La création de modules d'adaptation est la prochaine étape. Ces modules peuvent aider à convertir et à traduire les données et les commandes, assurant l'interopérabilité entre le MM et les autres systèmes.

Pour une intégration orientée services des MMs, les étapes suivantes sont proposées. 1. Identification des services : identification des applications que le MM effectuera dans le système. Les principales applications et missions sont considérées comme des services qui pourraient être utilisés par différents départements du système. 2. Décomposition des services : l'objectif de cette étape est de décomposer les applications en opérations standard contenant des tâches de base. 3. Détail des services : pour les tâches définies à l'étape précédente, l'interface, les entrées, les sorties et les paramètres requis doivent être déterminés. 4. Découverte des services : cette étape aide à présenter le MM aux autres composants afin que le système puisse voir et interagir avec le MM. La section supérieure de la Figure B.34 présente une représentation de haut niveau des divers modules et services intégrés dans l'architecture proposée. En revanche, la partie inférieure offre une visualisation détaillée et donne un aperçu plus approfondi des complexités et des interconnexions des composants du système.

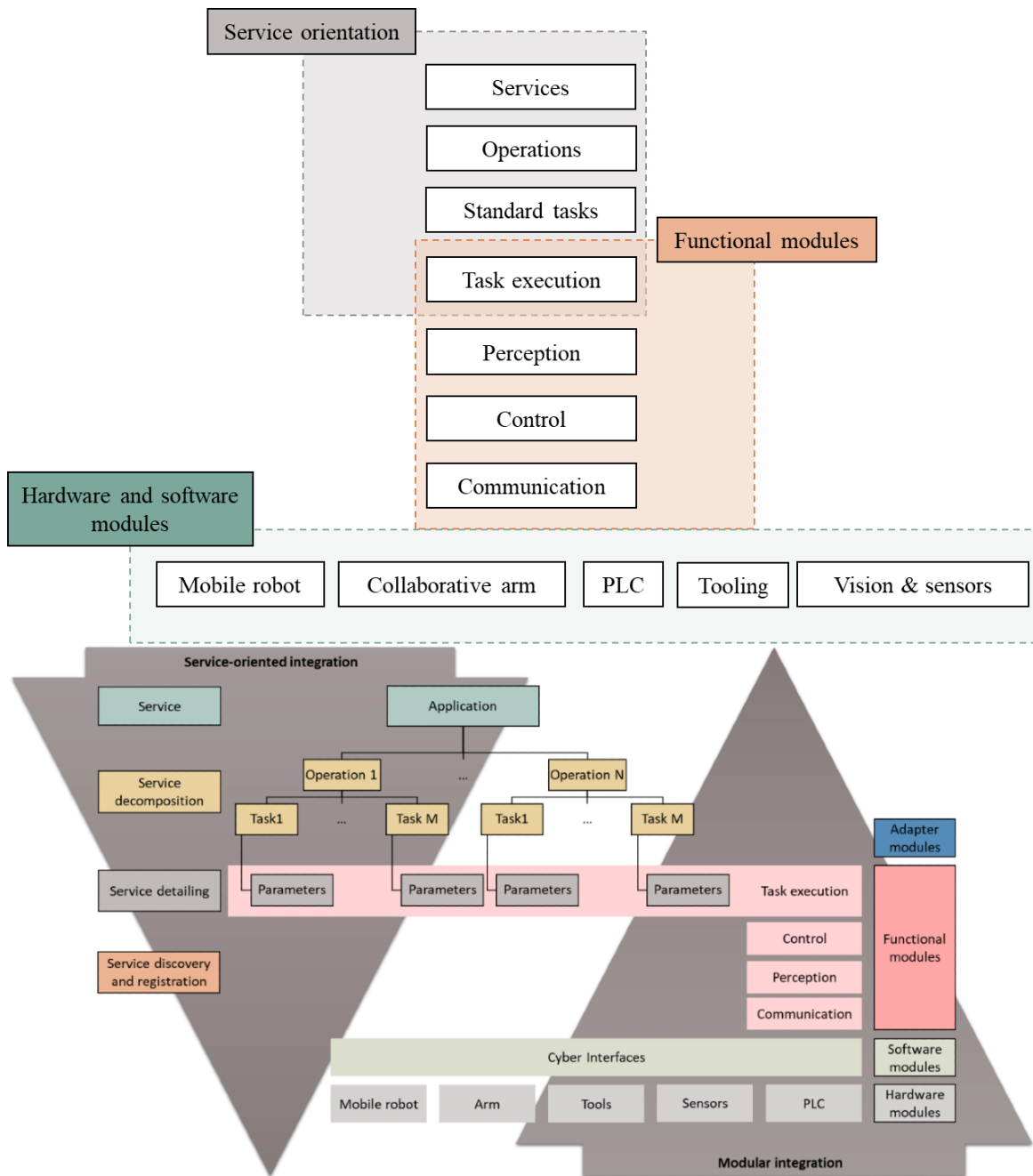


FIGURE B.34 – En haut, une représentation de haut niveau des divers modules et services ; En bas, une visualisation détaillée des complexités et des interconnexions des composants du système.

Outils auxiliaires pour l'architecture proposée

Protocoles de communication

Une infrastructure de communication et de réseau robuste et appropriée est essentielle pour la

mise en œuvre efficace de la majorité des principes de l'Industrie 4.0. Elle sert de colonne vertébrale aux avancées technologiques et aux capacités transformatrices que l'Industrie 4.0 offre, permettant des opérations efficaces, une productivité améliorée, et la réalisation du plein potentiel de la fabrication intelligente et de la transformation numérique. Pour une intégration interopérable, la normalisation et la compatibilité sont essentielles. Des protocoles de communication normalisés, des formats de données harmonisés, des messages compatibles, et des commandes conformes aux normes industrielles sont vitaux. D'autre part, pour une architecture décentralisée, le traitement et l'analyse des données en temps réel sont essentiels. Pour une intégration avec des capacités en temps réel, il est important de sélectionner judicieusement des protocoles de communication capables de traiter des volumes élevés de données à grande vitesse.

Décentralisation adaptative

En fonction d'une gamme d'indicateurs spécifiques, le besoin de décentralisation peut varier considérablement selon les services. Dans cette optique, le tableau présenté dans la Figure B.35 est conçu comme un outil. Il offre des informations sur la pertinence de la décentralisation pour chaque service avec différents scénarios et situations. Cet outil aide à faire un choix éclairé, en créant le bon équilibre entre des cadres centralisés, hybrides et décentralisés, adaptés aux exigences uniques de chaque service.

L'un des accomplissements les plus importants du système en adoptant une architecture décentralisée est l'augmentation de la flexibilité. Si l'on s'attend à ce que les services évoluent ou s'adaptent rapidement à des scénarios changeants, des systèmes décentralisés ou hybrides peuvent être plus adaptés. Si le service exige une prise de décision rapide basée sur des données en temps réel, une approche décentralisée peut être plus efficace en raison de la réduction de la latence. Cependant, des infrastructures adaptées telles que des protocoles de communication ayant la capacité de transférer rapidement des données en grande quantité sont nécessaires pour fournir une architecture décentralisée, comme mentionné dans la section précédente.

Plus les services sont indépendants ou contiennent plus de données, plus il est recommandé d'utiliser des architectures centralisées, notamment pour des services sensibles et critiques où aucune erreur n'est acceptable, ou en termes de sécurité, pour des services contenant des informations sensibles qui ne doivent pas être divulguées.

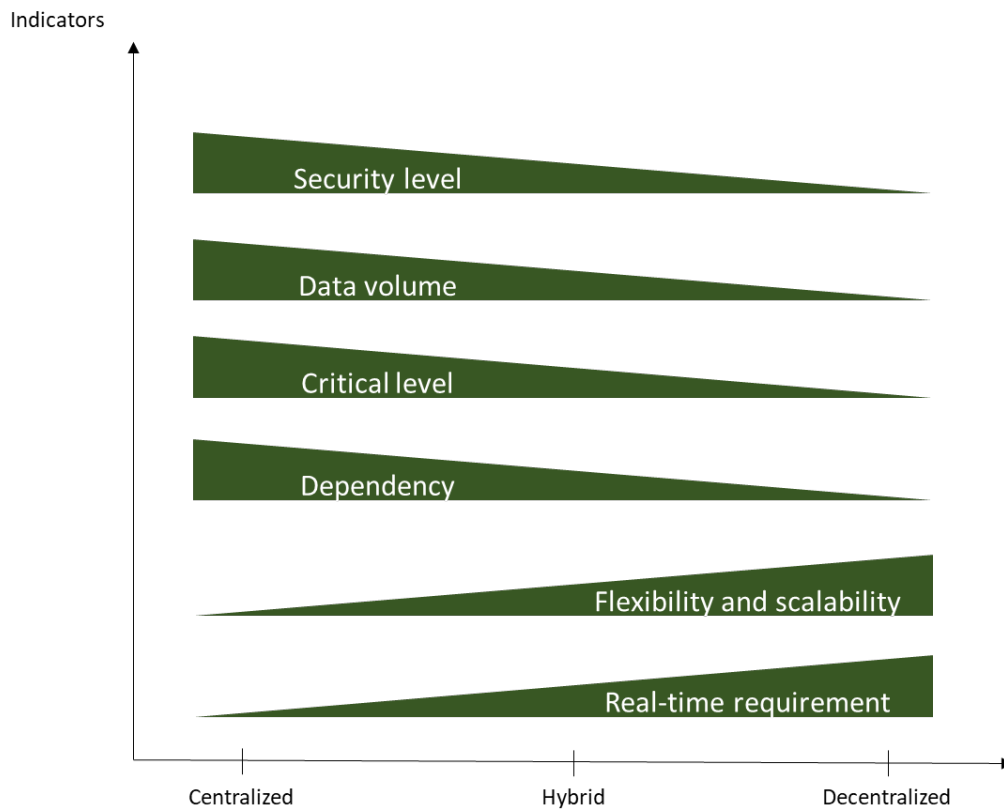


FIGURE B.35 – La pertinence de chacune des approches décentralisées, centralisées ou hybrides selon différents indicateurs

B.15 Conclusion

Dans ce chapitre, le cadre proposé et ses composants sont expliqués en détail. Dans ce cadre, trois phases principales ont été proposées. La première phase examine les besoins du système existant en matière de MM et identifie les applications potentielles et la finalité de son utilisation. Dans la deuxième phase, la préparation du système existant et de son infrastructure est examinée. Cette phase examine initialement les caractéristiques du système en mode général et selon les principes liés à l'Industrie 4.0. Ensuite, après avoir identifié les points faibles et forts du système, des modifications nécessaires ou recommandées peuvent être apportées ainsi que la décision concernant le MM le mieux adapté. Le processus d'intégration et les considérations nécessaires sont mentionnés dans la troisième phase, où différents types d'intégration ont été introduits et leur relation avec chaque principe de l'Industrie 4.0 a été découverte. Sur la base de l'analyse de tout ce qui précède, une architecture orientée services

modulaire a été proposée avec une décentralisation adaptative basée sur l'interopérabilité en temps réel et les capacités virtuelles.

B.16 Expérimentation

B.17 Introduction to Platform 4.0

Dans la plateforme 4.0, une ligne de production est fournie, équipée d'un tour et d'une fraiseuse, d'une machine de découpe laser et de deux robots Kuka, avec un système de vision pour détecter et classer les pièces brutes, ainsi qu'un scanner 3D FARO pour le contrôle qualité, connectés et intégrés, et contrôlés par MES, qui sera expliqué par la suite. La Figure B.36 montre la plateforme 4.0 après l'intégration de MoMa (voir section 4.2).

B.17.1 Système de contrôle : MES

Le processus de prise de décision et de planification est attribué au MES au lieu du Contrôleur Logique Programmable (PLC). Il existe des opérations de production standard en termes de transfert, d'usinage, de contrôle qualité et de surveillance. Une approche modulaire est utilisée pour rassembler les opérations nécessaires dans une séquence appropriée pour des fonctions spéciales. Par exemple, si un produit nécessite un usinage au tour, ce module contient deux opérations comme suit. Tout d'abord, prendre la pièce de l'entrepôt initial, puis déposer la pièce dans la machine à tour. Pour la fabrication d'un produit, plusieurs modules doivent être appliqués en continu de la pièce brute au produit final. Ces modules sont initiés par des commandes du MES [152].

B.18. INTRODUCTION À NOTRE ARCHITECTURE DE MANIPULATEUR MOBILE



FIGURE B.36 – Plateforme 4.0

B.18 Introduction à notre architecture de manipulateur mobile

Un MM d'OMRON a été utilisé et est montré dans la Figure B.37. OMRON définit MoMa comme un concept, qui doit être exploré en termes de mobilité, d'opération de robot collaboratif (cobot) et de sécurité.

B.18.1 Architecture matérielle

Comme le montre la Figure B.37 et expliqué dans le Tableau B.4, il contient un robot mobile LD-90 d'OMRON, et sur le dessus d'une table de montage, un cobot TM5 est installé, équipé d'un système de vision intégré et d'une pince flexible à deux doigts. Le système de vision intelligent offre la possibilité de lire des codes-barres et de reconnaître la forme, la couleur et la correspondance de motifs. Le robot utilise un repère en tant que point de référence afin de mieux localiser les objets dans l'espace de travail. Le contrôleur système, le contrôleur de sécurité et la communication avec les périphériques sont intégrés dans l'armoire électrique. La plateforme mobile est autonome et auto-rechargeable et

B.18. INTRODUCTION À NOTRE ARCHITECTURE DE MANIPULATEUR MOBILE

utilise des lasers de balayage. Un automate programmable OMRON NX 102 est intégré pour être le maître des deux robots.

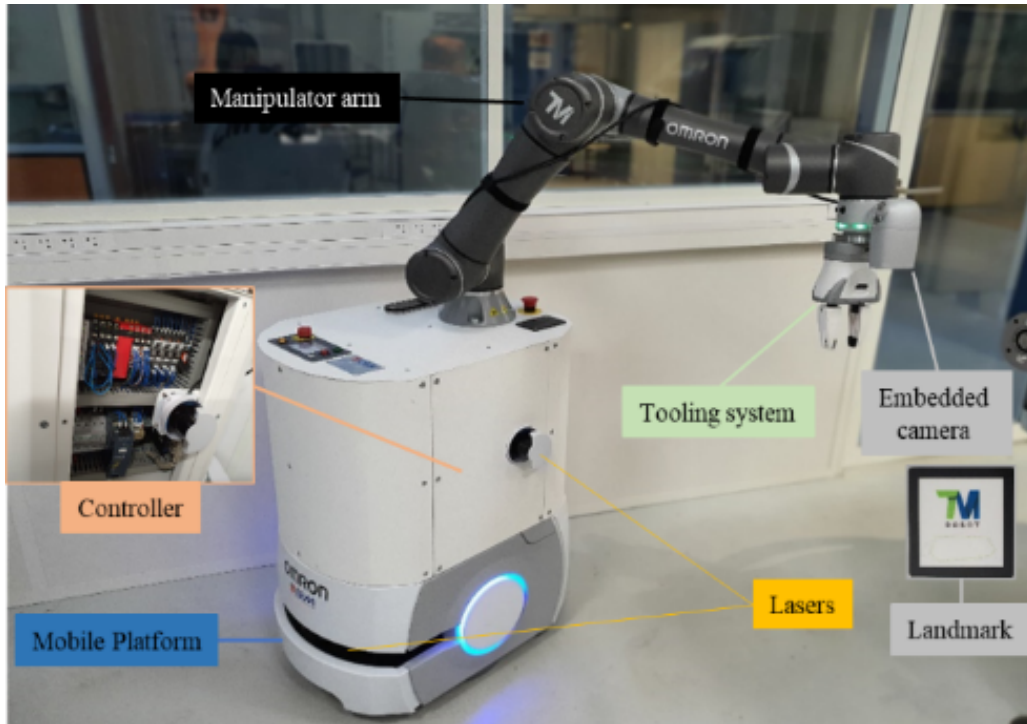


FIGURE B.37 – Architecture physique de MoMa d'OMRON

TABLE B.4 – Components Integrated to Form the MoMa Omron

Component	Specification
Mobile Platform	LD-90
Robot Manipulator	TM5M-900
Tooling System	Schunk EGH 80 gripper
Vision System	Integrated vision system 5M pixels, color
PLC	NX 102

B.18.2 Architecture logicielle

Le logiciel de gestion avancée de l'automatisation robotique (ARAM) fonctionne sur le cœur de la plateforme LD. Le langage de programmation utilisé pour intégrer une flotte de robots mobiles autonomes avec un système d'automatisation externe est le langage de commande robotique avancé (ARCL). Une interface graphique appelée TMflow existe pour le robot TM, qui fournit une interface complète pour les environnements de programmation logique. Le PLC prend en charge un logiciel appelé Sysmac Studio intégrant les fonctions nécessaires à la conception de machines.

B.19 Étude de cas : Déploiement du cadre proposé Processus d'intégration du manipulateur mobile dans la plateforme 4.0

La conduite d'une expérience pratique dans le monde réel est une confirmation de notre cadre proposé. Dans cette section, le processus d'intégration d'un MM de la société OMRON dans la Plateforme 4.0 est décrit, qui est un système de production de recherche sur le campus des Arts et Métiers de Paris. Comme le suggère le cadre, commençons par une analyse des caractéristiques du système de production existant, suivie de la détermination de nos attentes vis-à-vis d'un MM, ce qui nous mène à une sélection appropriée de MM. Ensuite, l'intégration pratique est discutée à différents niveaux. La figure B.38 présente les considérations et les défis à chaque étape de l'intégration expérimentale.

B.19. ÉTUDE DE CAS : DÉPLOIEMENT DU CADRE PROPOSÉ PROCESSUS D'INTÉGRATION DU MANIPULATEUR MOBILE DANS LA PLATEFORME 4.0

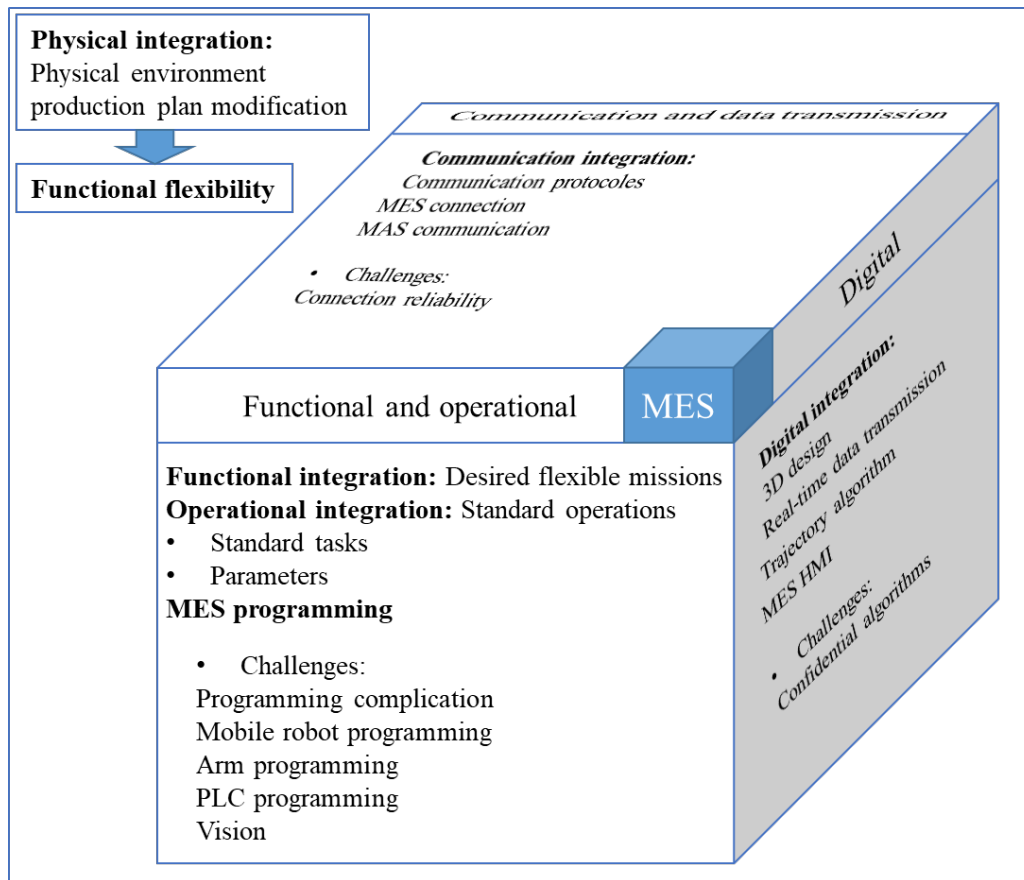


FIGURE B.38 – Considérations et défis à chaque étape de l'intégration expérimentale

B.19.1 Phase I : Objectifs et Applications

Dans le contexte de la Plateforme 4.0, cette étude de cas se concentre sur l'opération de "pick and place". La tâche pour le MM est de fournir des matières premières à la station initiale qui est proche du robot KUKA fixe.

B.19.2 Phase II : Préparation de l'infrastructure

B.19.2.1 Phase II-I : Pré-étude

La Plateforme 4.0 a été conçue et développée avec l'objectif clair de faire évoluer le système de production traditionnel 3.0 vers le modèle plus avancé 4.0. Pour ce faire, plusieurs axes de recherche ont été définis. Cependant, il est important de reconnaître que la Plateforme 4.0, dans sa forme actuelle, n'est pas un système purement 4.0. Elle combine des éléments des paradigmes 3.0 et 4.0, en faisant

B.19. ÉTUDE DE CAS : DÉPLOIEMENT DU CADRE PROPOSÉ PROCESSUS D'INTÉGRATION DU MANIPULATEUR MOBILE DANS LA PLATEFORME 4.0

un modèle hybride. Cet état de transition et d'évolution n'est pas unique à une organisation ou un département. Un nombre significatif d'entreprises dans le monde sont à un stade similaire, essayant de s'aligner sur la vision de l'Industrie 4.0.

Commencer par des évaluations physiques, dans un premier temps, il n'y avait pas de segments reconnaissables et spécifiques dans la plateforme. Les dimensions et les caractéristiques de l'aménagement de la plateforme ont été reconnues en créant une carte détaillée complète de la zone. Une carte détaillée avec l'équipement est présentée dans la figure B.39 et une carte avec les dimensions exactes est montrée dans la figure B.40. Dans ce système, les pièces du jeu d'échecs sont fabriquées. Les matériaux cylindriques servent de point de départ pour façonner chaque pièce unique.

Dans le processus de création de ces pièces d'échecs, un plan de fabrication détaillé a été mis en place. Le début de la chaîne de production se trouve près du robot fixe. Dans l'espace de travail commun partagé par les robots fixes et mobiles, dix positions distinctes ont été réservées. Ces robots ont la capacité de déterminer si ces positions désignées sont occupées ou vides.

Le robot fixe initie le processus en transférant la matière première de son point initial à la première position disponible. Selon les exigences spécifiques de la pièce, le robot mobile déplace ensuite le composant brut dans l'une des machines CNC. Certaines pièces sont conçues uniquement sur le tour, d'autres exclusivement sur la fraiseuse, et il y en a qui nécessitent un ordre précis d'opérations sur les deux machines. Pour les pièces qui nécessitent les deux machines, le robot mobile récupère le composant de la première machine, le positionne dans un endroit ouvert et, si la machine suivante est prête, le transfère là-bas. Une fois terminé, le robot mobile place les articles finis dans un endroit commun, signalant au robot fixe. Ce dernier déplace ensuite la pièce terminée sur un système de convoyeur, qui à son tour achemine ces produits vers la table d'accumulation. Entre-temps, la plateforme est équipée d'un scanner 3D qui peut être utilisé pour le contrôle de la qualité des pièces à différentes étapes de production.

Cependant, certains aspects du système ne sont pas encore rationalisés. L'étape initiale de placement des matières premières était effectuée manuellement, et il n'y avait aucun mécanisme en place pour détecter intelligemment lorsque les matériaux étaient épuisés. De même, les produits finis restaient soit sur la table de collecte, soit étaient manipulés manuellement pour un déplacement ultérieur. Il est à noter qu'il n'y avait pas d'approche systématique pour séparer et comptabiliser les articles bruts et finis. Étant donné l'objectif global de transition complète vers un système Industrie 4.0, il est

impératif que ces lacunes soient comblées tout en s'alignant sur les principes de l'Industrie 4.0.

Alors que ce système est issu d'une architecture d'automatisation conventionnelle, il évolue désormais vers un réseau d'automatisation plus complexe qui a émergé dans les écosystèmes de fabrication avec l'introduction du concept de CPS (Cyber-Physical System). Par conséquent, l'état actuel du système sur la plateforme peut être décrit comme une configuration hybride, faisant le pont entre les anciens et nouveaux paradigmes de la technologie d'automatisation. La tâche d'identification des robots pour le placement des pièces s'effectue de manière décentralisée. Les robots communiquent entre eux pour détecter la présence ou l'absence de pièces dans différents emplacements. Ils reconnaissent également les positions les uns des autres dans l'espace de travail partagé pour garantir la sécurité et éviter les collisions potentielles.

Pour garantir l'interopérabilité sur la plateforme, plusieurs éléments doivent être soigneusement pris en compte. Cela comprend l'architecture informatique de la plateforme, les méthodes de communication entre les composants, l'infrastructure de connectivité, les formats de données actuellement utilisés et la stabilité et la couverture du réseau Wi-Fi. Tous ces facteurs sont cruciaux pour déterminer l'intégration et l'interaction transparentes des composants du système. La liste des protocoles de communication compatibles avec l'équipement de la plateforme comprend OPC UA, Ethernet/IP, Profinet, Modbus, etc. Les machines, y compris les tours, les fraiseuses, les outils de coupe et les robots, communiquent directement avec la couche PLC. La communication entre les machines et le PLC est facilitée à l'aide de méthodes de communication industrielle I/O, Profinet et autres pour le transfert de données de base et le contrôle automatisé. Les données échangées entre les machines et le PLC sont transmises au MES via une connexion établie entre le MES et le PLC utilisant le Profinet de Siemens configuré dans le serveur d'intégration du MES. Les machines disposent d'une couche supplémentaire de composants IoT. Cela inclut les capteurs accéléromètres d'Intellinova sur le tour, les capteurs de surveillance de puissance de Socomec sur leurs entrées d'alimentation et la boîte IoT de Sick qui est reliée à la fois aux jauges de position et de température sur les découpeuses laser. Tous ces dispositifs IoT communiquent directement avec le MES via le protocole Modbus. Le scanner 3D FARO communique avec le MES en utilisant le protocole OPC UA. Une communication réseau directe est établie entre le MES et les machines pour partager les programmes G-code.

Différents modules fonctionnels ont été définis sur la plateforme. Ces modules ont été définis comme des processus séparés qui, ensemble, pourraient structurer une opération. Ils peuvent être réorganisés

B.19. ÉTUDE DE CAS : DÉPLOIEMENT DU CADRE PROPOSÉ PROCESSUS D'INTÉGRATION DU MANIPULATEUR MOBILE DANS LA PLATEFORME 4.0

et orchestrés dans diverses configurations, permettant la production d'une gamme variée de produits.

Les infrastructures nécessaires pour le transfert de données en temps réel existent et sont prouvées dans la couche IoT, et également dans le DT. Un jumeau numérique basé sur Unity3D a été conçu et intégré à la plateforme. Tirant parti des outils et technologies de simulation, des représentations 3D de robots et de machines ont été créées avec KUKASim puis importées dans le framework Unity3D. Ce jumeau numérique fonctionne en mode observation et simulation. Sur la plateforme, le MES englobe plusieurs applications orientées service. Cela comprend l'environnement de développement intégré (IDE) de la plateforme système Aveva, le serveur d'intégration, l'IHM construite via Intouch OMI et l'historique des données. De plus, un serveur DNS est ajouté au serveur principal, facilitant l'activation de l'application Intouch Access Anywhere.

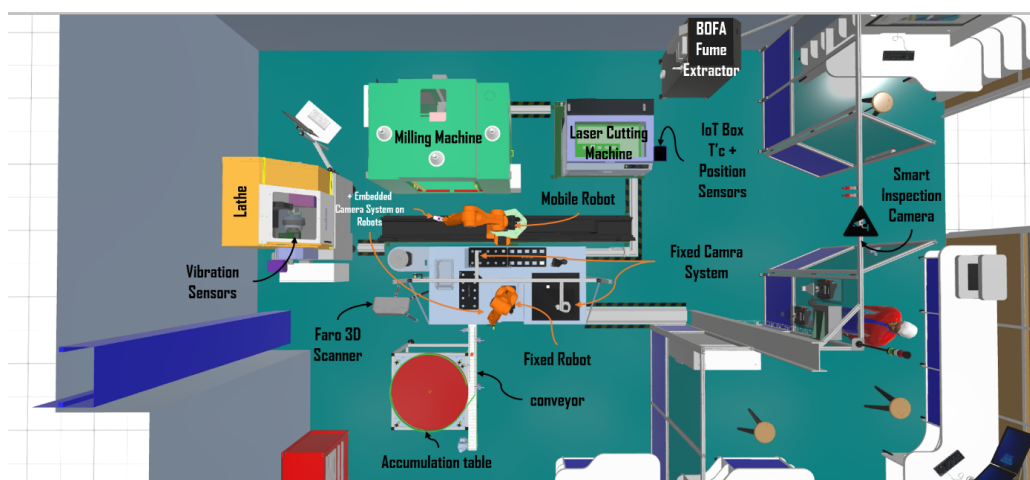


FIGURE B.39 – Équipement de la plateforme industrielle 4.0

B.19. ÉTUDE DE CAS : DÉPLOIEMENT DU CADRE PROPOSÉ PROCESSUS D'INTÉGRATION DU MANIPULATEUR MOBILE DANS LA PLATEFORME 4.0

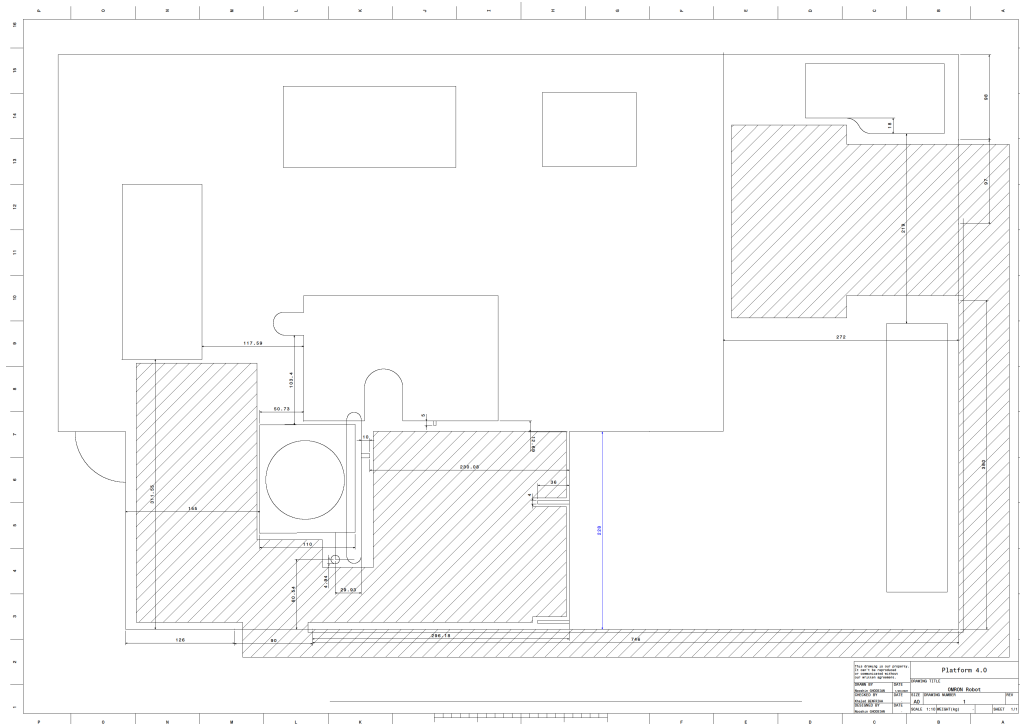


FIGURE B.40 – Plan de la plateforme 4.0 avec dimensions

B.19.3 Phase II-II : Modification de l'infrastructure et sélection du manipulateur mobile

Réfléchissant à la phase précédente, les caractéristiques liées à la plateforme 4.0 ont été recueillies et analysées. OMRON a démontré sa compatibilité en offrant des fonctionnalités compatibles avec les configurations précédentes. Comme introduit dans la section 4.2, un design unique d'un manipulateur mobile a été spécialement conçu pour la plateforme 4.0. L'un des aspects notables de MoMa est son design compact. Ce MoMa a été conçu de manière à pouvoir naviguer et opérer en fonction des dimensions spécifiques de la plateforme. Cette construction efficace le rend particulièrement utile pour un déploiement dans des espaces restreints et assure une utilisabilité maximale même dans des zones à espace limité.

Pour faciliter la manœuvre aisée du manipulateur mobile sur la plateforme, une série de réaménagements spatiaux a été proposée. Initialement, il était urgent de retirer entièrement un bureau pour fournir un chemin dégagé à MoMa. De plus, une refonte de la disposition des machines CNC était nécessaire pour que MoMa puisse gérer efficacement les articles en cours de travail (WIP) ou charger et décharger des machines. Cependant, cette modification a rencontré un obstacle car il y avait un

fort désir de conserver inchangée la configuration d'autres composants du système, notamment en raison des directives de recherche en cours. De plus, en raison des limitations d'espace, des changements majeurs n'étaient pas possibles. En conséquence, plusieurs applications potentielles initialement envisagées pour MoMa ont dû être retirées de la liste prévue. La section d'inventaire n'existait pas auparavant sur la plateforme 4.0. Une zone a été créée pour servir de stockage de matières premières afin que le MoMa puisse automatiquement déplacer les pièces brutes du stockage vers les postes de travail de production.

B.19.4 Phase III : Intégration

B.19.4.1 Intégration Physique

Initier le mouvement du manipulateur mobile (MM) nécessite la création d'une carte complète de son environnement opérationnel. Cette étape fondamentale est réalisée en naviguant manuellement le MM à travers la zone désignée, lui permettant de scanner et de documenter chaque recoin de l'espace. Une fois une carte détaillée de l'atelier développée, il devient impératif de localiser les emplacements spécifiques des postes de travail sur cette carte. Une telle démarcation précise garantit que le MM a des points de référence et des destinations clairs pendant sa phase opérationnelle.

Cependant, l'adaptabilité et l'efficacité du MM ne dépendent pas uniquement de l'exactitude de la carte. Les caractéristiques uniques de l'environnement jouent un rôle crucial dans la dictée de sa performance. Une pléthore de paramètres, influencés par les conditions environnementales, nécessitent un ajustement méticuleux pour optimiser le mouvement du MM. Un obstacle significatif se présente lorsqu'on considère les contraintes fixées par la plateforme 4.0. Compte tenu de ses dimensions, atteindre la vitesse maximale du MM devient un défi. De plus, naviguer à travers des passages plus étroits exige un recalibrage soigneux du dégagement du robot. Mais cet ajustement n'est pas simple.

Modifier le dégagement et l'espace libre du MM affecte intrinsèquement ses marges de sécurité. Une réduction de ces métriques, tout en permettant potentiellement une navigation plus fluide dans des couloirs étroits, peut compromettre les protocoles de sécurité du robot. Trouver cet équilibre devient primordial - il est nécessaire de trouver l'équilibre parfait, où le MM fonctionne à des vitesses optimales sans compromettre les normes de sécurité.

B.19.4.2 Intégration de Communication

Du niveau PLC au niveau MES

Des variables ont été définies et des scripts primaires pour un scénario de pick-and-place ont été formulés. Utilisant le studio Sysmac, les postes de travail successifs à atteindre et les opérations essentielles pour le robot collaboratif peuvent être déterminés. Cependant, au sein de la plateforme 4.0, un plan de production régi par un MES existait. Par conséquent, pour l'intégration sans heurt du MM dans le système de production, garantir son contrôle de manière congruente est impératif.

Une étape importante implique l'identification du protocole de communication optimal, celui qui est congruent avec à la fois le logiciel PLC et MES. Dans cette recherche, OPC UA a été employé pour fusionner le MoMa avec le MES. Après cette intégration, les variables du PLC peuvent être récupérées. Au sein du MES, une entité et les attributs du MoMa OMRON ont été délimités. Pour les variables extraites, une capacité de surveillance en temps réel des valeurs est présente, en plus de la possibilité de saisir une valeur préférée pour chaque variable. Des commandes pour initier une opération de pick-and-place peuvent être envoyées via le MES, spécifiant le poste de travail voulu et choisissant les chemins corrects pour le robot TM.

Une zone est identifiée comme le principal centre de contrôle. Dans ce centre, le serveur central qui exploite le système de supervision est situé, aux côtés du PLC principal. Chaque machine et robot dans ce système est déjà lié à ce PLC central, leur accordant l'accès au MES. Lors de l'intégration de MoMa dans ce cadre de production établi, l'approche la plus rationalisée était de connecter directement le PLC de MoMa au MES. L'infrastructure informatique et ses capacités ont été évaluées minutieusement avant de faire cette connexion. Le protocole de communication idéal, pris en charge à la fois par le MES et MoMa, a été déterminé comme étant OPC UA dans ce contexte. Étant donné la nature mobile de MoMa, des connexions filaires n'étaient pas réalisables pour son intégration dans le réseau principal. Par conséquent, une connectivité sans fil a été mise en place en utilisant des routeurs doubles, comme illustré dans la Figure B.41.

B.19. ÉTUDE DE CAS : DÉPLOIEMENT DU CADRE PROPOSÉ PROCESSUS D'INTÉGRATION DU MANIPULATEUR MOBILE DANS LA PLATEFORME 4.0

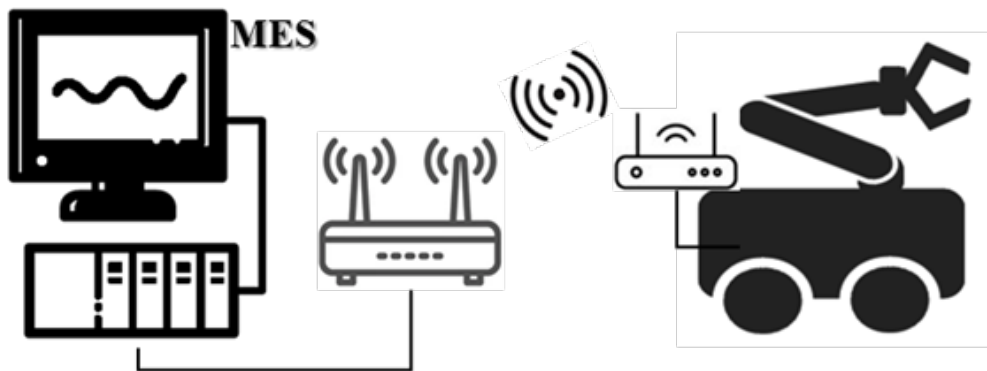


FIGURE B.41 – Diagramme de connexion réseau pour l'intégration de MoMa

B.19.4.3 Intégration Fonctionnelle et Opérationnelle

Basée sur l'architecture modulaire orientée service, différentes applications des manipulateurs mobiles (MM) pourraient être définies comme des services. Chaque service contient des opérations standard composées de tâches standard. Chaque tâche a ses propres paramètres, qui sont possibles à définir via le MES. Pour un service hypothétique comme le transfert de composants bruts du stockage à un emplacement spécifié, les procédures de routine et les tâches associées avec leurs spécificités sont illustrées dans la Figure B.42 et détaillées davantage dans le Tableau B.5.

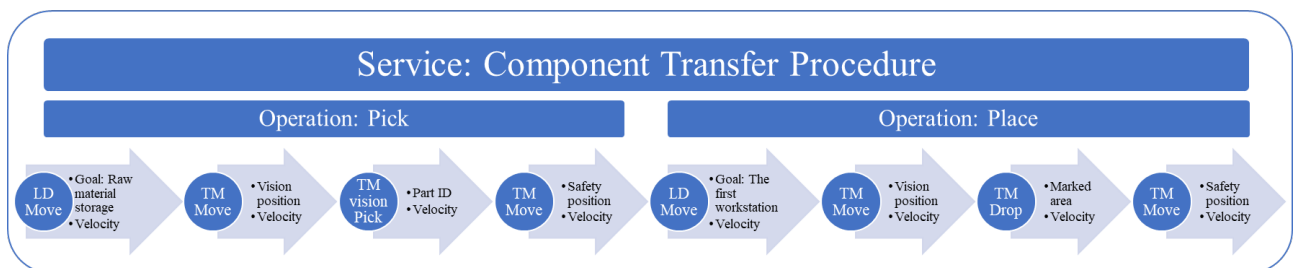


FIGURE B.42 – Tâches standard, paramètres et opérations requis pour remplir un exemple de service de prise et de placement

B.19. ÉTUDE DE CAS : DÉPLOIEMENT DU CADRE PROPOSÉ PROCESSUS D'INTÉGRATION DU MANIPULATEUR MOBILE DANS LA PLATEFORME 4.0

TABLE B.5 – Tâches et opérations des dispositifs

Appareil	Service	Opérations	Tâches avec paramètres	Description	Outils
LD	Raw material Transfer Procedure	Pick	LD Move to Goal : Pick_Raw	Sends the mobile platform to the raw material storage	Lasers
TM			TM Move to point : Vision position	TM robot moves to the vision position for activating the camera	Camera
TM			TM Vision Pick the part : Raw material	TM robot picks the raw material from raw material storage	
TM			TM Move to point : Safety position	TM robot moves to a safety position that activates a sensor to allow the LD to move	Safety sensor
LD		Place	LD Move to Goal : Workstation1	Sends the mobile platform to the first workstation	Lasers
TM			TM Move to point : Vision position	TM robot moves to the vision position for activating the camera	Camera
TM			TM Vision Drop in : Marked area	TM robot drops the raw material in a predefined special place detected by camera	
TM			TM Move to point : Safety position	TM robot moves to a safety position that activates a sensor to allow the LD to move	Safety sensor

Après avoir reçu une commande de MES pour activer une mission de transfert de composants (pick and place) avec des paramètres spécifiques, MoMa commence à effectuer les opérations mentionnées ci-dessus. La Figure B.43-gauche montre le processus de cueillette guidée par vision des matières

B.19. ÉTUDE DE CAS : DÉPLOIEMENT DU CADRE PROPOSÉ PROCESSUS D'INTÉGRATION DU MANIPULATEUR MOBILE DANS LA PLATEFORME 4.0

premières dans le magasin de matières premières et leur dépôt dans la station souhaitée est montré dans la Figure B.43-droite.



FIGURE B.43 – Opération de cueillette guidée par vision de pièces brutes (gauche) et opération de placement guidée par vision de pièces brutes (droite)

Pour des services spécifiques de transfert de composants (pick and place), des tâches standard ont été déterminées. Pour chaque tâche, des paramètres doivent être assignés et MM doit être programmé. Comme expliqué dans l'architecture logicielle, trois logiciels différents sont assignés à chaque module de MoMa. Bien que le PLC agisse en tant que contrôleur principal pour le LD et le TM, la programmation initiale et la configuration de l'infrastructure pour chacun sont menées séparément. Cependant, cela est fait dans une perspective synchronisée. Par la suite, des commandes pour diriger les deux sont élaborées et implémentées dans le PLC.

Dans la section d'intégration physique, la carte de l'environnement pour LD a été créée. Pour maintenir la sécurité, des restrictions et les paramètres nécessaires ont également été intégrés sur la carte. Bien qu'il soit possible d'envoyer le LD à n'importe quel point en entrant les coordonnées de l'emplacement souhaité dans le MES, cette fonctionnalité est très flexible, mais pour augmenter la précision, il est recommandé de créer des emplacements avec le nom "Objectif" sur la carte. Ces objectifs, qui peuvent être personnalisés avec le nom de l'endroit souhaité, sont enregistrés comme paramètres des tâches. Ainsi, par exemple, l'objectif nommé "Pick-Raw" est le point le plus approprié pour placer MoMa près de la zone de stockage des matières premières. Car la reproductibilité de MoMa était toujours appropriée pour l'atteindre pendant une expérience élevée et à partir de différents points

B.19. ÉTUDE DE CAS : DÉPLOIEMENT DU CADRE PROPOSÉ PROCESSUS D'INTÉGRATION DU MANIPULATEUR MOBILE DANS LA PLATEFORME 4.0

de départ. Pour atteindre le point hypothétique A, le LD pouvait facilement aller de B à A, tandis que s'il se trouvait au point hypothétique C, il aurait eu du mal à atteindre le point A. De plus, en général, la répétabilité pour une position est de ± 65 mm, et pour la cible standard de ± 25 mm, $\pm 2^\circ$. Une autre force est de créer des objectifs prédéterminés, et de créer une plateforme appropriée pour la programmation correcte des mouvements souhaités et des points pour TM. Cependant, dans tous les cas, le LD atteint la cible avec une précision de ± 25 mm, $\pm 2^\circ$, et cela n'est pas adapté pour les tâches sensibles du TM qui exigent une haute précision. C'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser des systèmes visuels et des caméras intégrées pour effectuer les tâches du TM. L'objectif principal pour le robot mobile est d'atteindre la station de matières premières. En exploitant sa vision par caméra intégrée et des repères distincts (se référer à la Figure B.37), le robot TM est équipé pour sélectionner le composant approprié. Après cela, il retourne dans une zone sécurisée au sein des locaux de MoMa, signalant au robot mobile avec une alerte d'annulation d'attente. Par la suite, alors que le robot mobile avance vers sa prochaine destination, le robot TM positionne le composant brut à un endroit prédéterminé.

Lorsque le robot mobile arrive à l'atelier prévu, la tâche désignée pour le manipulateur se met en action. Chaque chemin de mouvement (ou cas) est associé à une variable spécifique. Pour orchestrer l'ensemble du processus de pick-and-place, l'opération 'pick-raw' est déclenchée lorsque le robot mobile se trouve au dépôt de matières premières, et l'opération 'place-raw' entre en jeu lorsqu'il atteint le premier atelier. Pour améliorer la précision du manipulateur, des repères sont utilisés par le système de vision intégré, aidant à la navigation du robot.

Le paramètre suivant fait référence à l'ID du composant. Cela sert d'instruction pour le système de vision pendant le processus de cueillette, le guidant sur quel composant spécifique identifier et ensuite cueillir. Il y a l'aspect des opérations de pick-and-place guidées par la vision. Ici, la caméra est entraînée à identifier et à assister dans la cueillette précise des objets et leur placement précis basé sur des repères visuels. Cela garantit que les objets sont manipulés correctement, assurant des opérations fluides et minimisant les erreurs. Il y a aussi la question de la programmation des mouvements du robot TM. Dans TMflow, des séquences et trajectoires précises sont définies pour le robot TM. Cela implique de cartographier comment le robot doit se déplacer, s'ajuster et s'orienter dans différents scénarios et à divers objectifs prédéfinis. Une telle programmation méticuleuse garantit que le robot fonctionne efficacement, s'adapte à différents environnements et s'aligne parfaitement avec les tâches

qu'il doit accomplir.

Après avoir établi des routines appropriées pour chaque appareil individuel, il devient essentiel d'entreprendre la programmation du PLC. Cette étape assure l'exécution séquentielle et harmonisée des programmes, alignant les opérations de chaque appareil pour fonctionner de manière cohésive. Le code est structuré comme un mécanisme de changement de cas qui dépend de l'état de la variable Step-Cycle.

Le code s'initialise en configurant un identifiant de tâche unique pour chaque opération de pick-and-place. Cela aide à suivre chaque opération distinctement. Une fois initialisé, l'AMR est dirigé vers son objectif initial, Pick-Raw, indiquant la position où il doit cueillir des matières premières. Après la cueillette, il est guidé vers Drop-Raw - l'emplacement désigné pour déposer ces matériaux.

La sécurité et la synchronisation sont primordiales dans de tels environnements automatisés. Ainsi, avant et après chaque tâche majeure, comme la cueillette ou le dépôt de matériaux, le statut de l'AMR est minutieusement vérifié. Des statuts spécifiques comme 'WAIT-PICK-RAW' et 'WAIT-DROP-RAW' agissent comme des indicateurs que l'AMR attend aux stations respectives. Ce n'est que lorsque l'AMR atteint une position sûre et que les conditions sont bonnes que le système lui permet de procéder.

De plus, pour assurer un fonctionnement harmonieux et éviter des collisions ou des accidents potentiels, le code surveille certaines conditions, éventuellement via des capteurs (MOD4-Si04-Value Logique et MOD4-Si05-Value Logique). Ces conditions agissent comme des points de contrôle, confirmant si le chemin est libre pour que le robot puisse avancer. Si une situation imprévue survient, le PLC peut émettre une commande d'attente, garantissant que le robot reste stationnaire jusqu'à ce qu'il soit sûr de bouger.

Enfin, après que l'AMR ait complété les tâches de pick-and-place désignées, le système se réinitialise, marquant la fin d'un cycle d'opération complet. Cette réinitialisation garantit que le robot est préparé et prêt pour le prochain travail, maintenant un flux cohérent et répétitif de tâches. Le code PLC sert également de pont de communication entre le MES et MoMa. Le protocole de communication OPC UA a été choisi à cet effet (voir l'intégration communicationnelle). Ce code, en tant que liaison de communication, assure que les directives du MES sont reçues et exécutées par MoMa, et relaie l'état opérationnel de MoMa au MES.

B.19. ÉTUDE DE CAS : DÉPLOIEMENT DU CADRE PROPOSÉ PROCESSUS D'INTÉGRATION DU MANIPULATEUR MOBILE DANS LA PLATEFORME 4.0

Initialement, le paramètre Step-Cycle est vérifié. S'il est réglé sur sa valeur par défaut de 0, cela indique que MoMa n'est pas engagé dans une tâche active. Ainsi, O-Rob-InCycle est défini sur FALSE, montrant que MoMa est inactif, et O-Send-CycleCode est activé (TRUE), signifiant la disponibilité de MoMa à accepter une nouvelle tâche. CycleValue est une variable définie dans le MES, sa valeur détermine la commande que le MES souhaite envoyer à MoMa. Lorsqu'un service est assigné via le MES, le CycleValue est défini. Par exemple, le régler sur 701 dans le MES déclenche le service de transfert de matières premières dans MoMa. Pour la sécurité, cette variable est définie de manière que le MES ne puisse pas directement Une fois que cette valeur est reconnue par le PLC (quand I-CycleCode-Sent est TRUE et que CycleValue n'est pas zéro), le système synchronise le Step-Cycle avec le CycleValue nouvellement défini. Cela marque effectivement le début de l'opération dans MoMa. O-Rob-InCycle passe à TRUE, illustrant que MoMa est maintenant opérationnel, et O-Send-CycleCode se désactive (FALSE), indiquant que MoMa est occupé et n'attend pas de nouvelles commandes.

Cependant, si le système MES réinitialise plus tard le CycleValue à 0 alors que O-Rob-InCycle reste TRUE, cela signifie la réception et la compréhension réussies de la commande MES par MoMa. Cela, à son tour, incite le robot à initier le cycle opérationnel spécifique lié à la CycleValue précédemment envoyée. Ainsi, créer CycleValue empêche efficacement le MES de changer directement Step-Cycle alors que MoMa est dans une autre opération ou que d'autres machines travaillent dangereusement dans sa zone de travail. Le Tableau B.6 résume les variables utilisées et leurs descriptions.

B.19. ÉTUDE DE CAS : DÉPLOIEMENT DU CADRE PROPOSÉ PROCESSUS D'INTÉGRATION DU MANIPULATEUR MOBILE DANS LA PLATEFORME 4.0

TABLE B.6 – Variables et Descriptions

Variable	Description
waiting Raw=true	Signal guidé par la vision qui spécifie un besoin de matière première
CycleValue	Valeur fixée par le MES pour indiquer l'opération ou la tâche souhaitée pour la MoMa. Une valeur différente de 0 indique une directive active.
Step_Cycle	Reflète la tâche ou l'opération que le MoMa est en train d'exécuter ou qu'il est prêt à exécuter, sur la base de CycleValue.
O_Rob_InCycle	Variable binaire indiquant si la MoMa est actuellement engagée dans une opération. VRAI signifie que la MoMa est opérationnelle, tandis que FAUX indique qu'elle est disponible pour de nouvelles tâches.
O_Send_CycleCode	Variable binaire informant le MES de l'état de préparation du MoMa. Lorsqu'elle vaut TRUE, elle indique que le MoMa est prêt à accepter de nouvelles commandes.
L_CycleCode_Sent	Indique si une nouvelle directive de tâche (CycleValue) a été reçue du MES. (Assure également que les autres robots ne travaillent pas dans la même zone de travail).

B.19.4.4 Intégration Numérique

Il est spécifié et déterminé comment les actifs physiques communiquent entre eux. D'autre part, les Systèmes Cyber-Physiques (CPS) permettent une configuration, un contrôle et une inspection en temps réel du système de production. Le PLC alimente le MES avec la coordination précise des robots LD et TM. En transférant la valeur de cette coordination en temps réel au programme de jumeau numérique. La plateforme actuelle, version 4.0, dispose d'un jumeau numérique connecté aux processus de fabrication. En plus de s'intégrer au monde réel, le MoMa l'a également fait avec le doppelganger numérique de la plateforme, comme on le voit dans la Figure B.44. Cela nous amène à utiliser un casque VR et un appareil manuel pour contrôler la machine virtuellement. De plus, avant de lancer la production, cela pourrait être un merveilleux simulateur pour tout vérifier à nouveau.

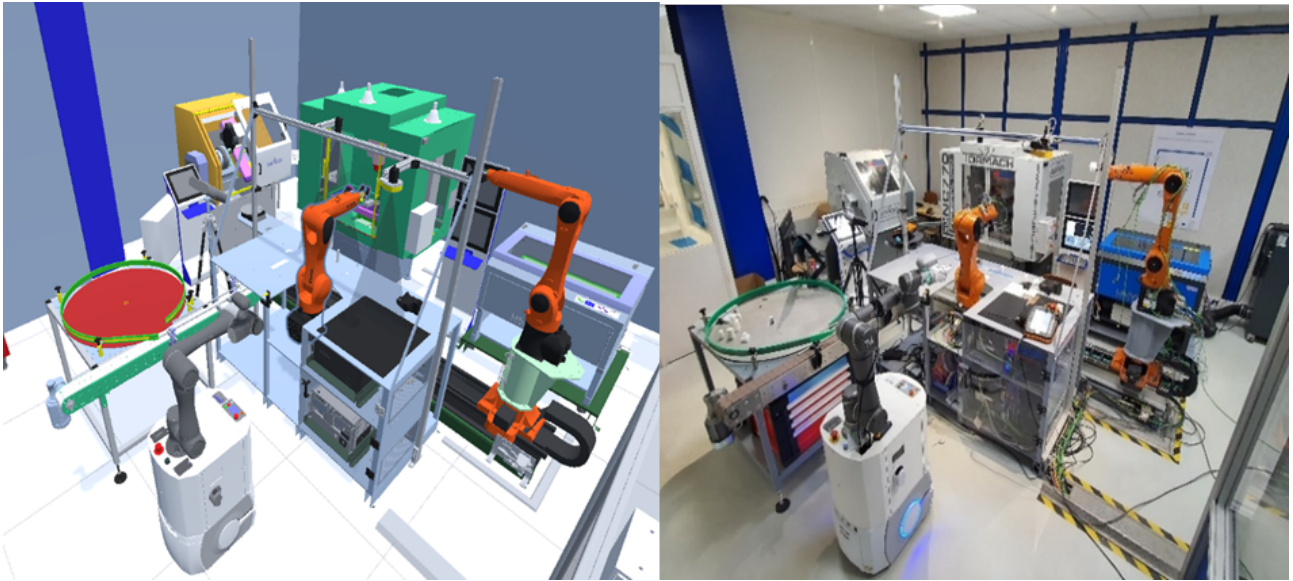


FIGURE B.44 – MoMa intégré au jumeau numérique (gauche) vs plateforme 4.0 (droite).

B.20 Discussion

La communication et la collaboration efficaces entre les MM et les autres composants de l'environnement de production sont désormais possibles en tirant parti des concepts de l'Industrie 4.0 tels que les CPS et l'IoT. Ce cadre englobe un ensemble complet de considérations pour garantir que tous les aspects importants du système de production sont pris en compte. De plus, la planification est réalisée grâce à la standardisation de l'intégration opérationnelle et fonctionnelle, en conjonction avec l'utilisation du MES. Le logiciel MES joue un rôle vital dans la facilitation des échanges de données en temps réel, l'allocation des tâches et la surveillance. L'approche standardisée proposée, combinée à l'utilisation intelligente du MES, aide à une coordination fluide des tâches et aboutit à une planification optimale dans le système de production. Ainsi, les MM sont capables de s'adapter rapidement à des séquences d'assemblage ou des variations de produits changeantes grâce à la paramétrisation de chaque tâche standard.

L'étude de cas met l'accent sur l'optimisation des tâches de manutention des matériaux. Le déploiement de MM permet une navigation autonome dans l'atelier de production, facilitant la récupération et la livraison des composants, ainsi que l'assistance aux opérations d'assemblage. Cette optimisation conduit finalement à une productivité accrue, permettant aux travailleurs humains de se concentrer

sur des tâches à plus forte valeur ajoutée, telles que le contrôle de la qualité et la résolution de problèmes complexes. La dernière image intégrant MoMa dans le système de production réel et virtuel de la plateforme 4.0 est montrée dans la Figure 45. Le cadre proposé est la méthode qui a été employée pour découvrir les exigences et les solutions offertes par les MM. Analyser les caractéristiques de la plateforme 4.0 sous différents angles pour découvrir ses limitations en vue d'améliorer le système de plus en plus vers les principes de l'industrie 4.0 est la première étape. L'intégration de MoMa est une étape cruciale vers la réalisation de processus de fabrication flexibles et adaptables. Cette intégration nécessite une considération minutieuse de divers aspects techniques, organisationnels et financiers pour garantir que le système reste efficace et efficace.

L'un des défis techniques clés est de concevoir le système de contrôle de manière à coordonner efficacement les tâches et les actions des robots mobiles et collaboratifs. De plus, le système doit être conçu pour fonctionner dans les contraintes de l'infrastructure de production existante, en tenant compte des systèmes de puissance, de communication et de sécurité disponibles. Définir comment communiquer et échanger des ordres de production entre MM et MES ou d'autres composants séparément est l'un des points abordés par le cadre.

D'un point de vue financier, ce cadre pourrait être utilisé pour estimer les coûts supplémentaires associés à l'acquisition et au déploiement des robots, ainsi que les modifications nécessaires au système de production et à l'infrastructure associée. Une analyse coûts-avantages soignée devrait être menée pour garantir que l'investissement dans MM offre un retour sur investissement positif à long terme.

Notre étude de cas est soumise à certaines limitations. Tout d'abord, il convient de noter que la portée de notre étude de cas est limitée à un type spécifique de système de production, et par conséquent, elle peut ne pas représenter pleinement la diversité des fonctionnalités que l'on suppose pour les MM en général. L'espace limité disponible pour le déplacement de MoMa a présenté des défis significatifs pour l'intégration fonctionnelle et opérationnelle. Cependant, en même temps, ce problème est devenu un moyen d'enquêter et d'optimiser les paramètres et les réglages du MoMa pour le déplacer avec le moins de restrictions possible, ce qui peut être amélioré dans des recherches futures. De plus, l'étude est limitée à l'intégration d'un seul MM dans le système. Cependant, notre cadre vise à offrir de la polyvalence pour garantir qu'il puisse être appliqué efficacement à une gamme de paramètres industriels réels et le positionne bien pour une expansion et un développement futurs.

Dans la suite, les hypothèses ont été énoncées une fois de plus et la manière dont le cadre aborde

chacune d'elles est discutée :

- Un cadre d'intégration structuré réduira considérablement les problèmes de compatibilité entre les MM et les systèmes de production existants, permettant plus de fluidité et de flexibilité lors de l'exécution de différentes opérations.

Le cadre d'intégration structuré aborde robustement les préoccupations de compatibilité entre les MM et les systèmes de production existants. En définissant initialement les rôles des MM dans la phase "Objectifs et Applications", il garantit que la nouvelle technologie s'aligne sur les objectifs de production, réduisant les inadéquations potentielles. Un aperçu clair du rôle et de la tâche de chaque MM assure des ajustements simplifiés lors des mises à jour. Pendant la phase de "Préparation de l'Infrastructure", l'étude préliminaire identifie les forces et les domaines nécessitant une amélioration, ouvrant la voie à des ajustements infrastructureux éclairés et à la sélection des MM qui résonnent avec les exigences du système. En reconnaissant les forces et les domaines potentiels d'amélioration, le cadre garantit que tout changement de système s'aligne parfaitement avec l'infrastructure existante. La "Phase d'Intégration" ultérieure affine davantage la compatibilité. Les intégrations Physique et Communicationnelle garantissent que les MM s'intègrent bien dans l'espace de production et peuvent communiquer efficacement, tandis que les intégrations Fonctionnelle et Opérationnelle garantissent qu'ils fonctionnent en synchronisation avec les processus en cours. Enfin, l'Intégration Numérique place les MM dans le cadre numérique de l'Industrie 4.0, optimisant l'opération.

Un enrichissement supplémentaire de l'MSOA est son accent sur la flexibilité et la scalabilité. En divisant les MM en modules matériels et logiciels distincts, les mises à jour peuvent être effectuées sur des parties spécifiques sans perturber l'ensemble du système. De plus, l'aspect orienté service garantit que les rôles des MM, divisés en tâches, sont clairs, permettant des transitions plus faciles lors des changements de système. Le cadre favorise également l'interopérabilité et crée des modules de compatibilité qui agissent comme des traducteurs lors des mises à jour, ce qui est essentiel pour maintenir le flux de production.

- En abordant les préoccupations industrielles clés à travers le cadre proposé, telles que la sécurité, la protection des données, l'interopérabilité, etc., le taux d'adoption des MM dans les environnements de production réels pourrait augmenter.

Dans la phase initiale, la définition des rôles et des tâches garantit que les MM s'alignent avec les

protocoles de sécurité et les normes de l'industrie. Cela garantit également que le MM n'interfère pas involontairement avec des opérations sensibles ou ne dépasse pas les limites prédéfinies. Pendant la deuxième phase, l'évaluation identifie les domaines à améliorer en matière de sécurité et d'interopérabilité, tandis que le processus de sélection des MM met l'accent sur la compatibilité et les fonctionnalités de sécurité. Cette évaluation agit comme une mesure préventive et garantit que l'infrastructure est suffisamment robuste pour prévenir toute exposition involontaire de données ou perturbations opérationnelles en identifiant les domaines potentiels de vulnérabilité. À mesure que la troisième phase se déroule, l'"Intégration Physique" garantit que les MM sont correctement situés dans l'environnement de production, minimisant les chances d'accidents physiques. L'"Intégration Communicationnelle" aborde spécifiquement l'interopérabilité, garantissant que les MM peuvent communiquer sans heurt avec les systèmes existants. En plus, elle établit des mécanismes clairs de flux de données, garantissant que les informations sensibles restent protégées contre les menaces potentielles. Parallèlement, l'"Intégration Fonctionnelle et Opérationnelle" garantit que les MM sont alignés avec les interfaces humaines, soulignant la nécessité d'une formation et d'une sécurité opérationnelle adéquates. En abordant systématiquement les besoins en matière de sécurité, d'interopérabilité et de formation, le cadre renforce la confiance dans l'adoption des MM, accélérant ainsi probablement leur acceptation dans les environnements de production.

D'autre part, en décomposant les MM en modules distincts - tant matériels que logiciels - et en définissant précisément des tâches orientées service, le cadre garantit une intégration fluide et sécurisée. Par exemple, les modules d'adaptation dans l'architecture peuvent agir comme des tampons, traduisant les commandes et garantissant que seules les données autorisées circulent entre le MM et les systèmes existants.

B.21 Conclusion et perspectives

La capacité de répondre rapidement aux demandes des clients et d'augmenter la productivité sans coûts excessifs est importante pour la fabrication dans le contexte de la flexibilité, qui est une caractéristique essentielle des usines intelligentes et compétitives. Les technologies émergentes telles que les opérations cloud et l'intelligence artificielle industrielle à l'ère de l'Industrie 4.0 peuvent faciliter le développement de systèmes de production flexibles. Les systèmes robotiques et les robots mobiles ont joué un rôle clé dans l'amélioration de l'efficacité et de l'autonomie des systèmes de fabrication. La com-

binaison des capacités de manipulation des bras robotiques avec la mobilité des robots mobiles permet la création de MM, qui peuvent être utilisés pour une variété d'applications afin d'accroître la flexibilité et l'efficacité du système dans son ensemble. Bien que les MM soient utilisés dans divers contextes, dans cette thèse, leurs applications industrielles sont examinées. Ils sont particulièrement bien adaptés aux tâches d'intralogistique comme l'alimentation en pièces à l'intérieur des lignes d'assemblage et le transport, comme la plupart des articles étudiés. L'inspection, la maintenance ou d'autres opérations en atelier telles que le soudage, le vissage, la peinture et la pulvérisation sont quelques-unes des autres applications mentionnées dans la littérature. Cependant, celles-ci doivent être modifiées pour répondre aux nouveaux concepts innovants et aux demandes des fabricants, à mesure que les connaissances progressent.

Le concept en développement de l'Industrie 4.0 implique la combinaison de plusieurs technologies, y compris l'IA, les CPS, le cloud computing, l'IoT, etc., pour créer des usines plus intelligentes pour l'avenir. Les usines intelligentes sont essentielles à l'Industrie 4.0 car elles fournissent l'autonomie au processus de production et lui permettent de se configurer, de se superviser et de se réparer de manière autonome. En permettant aux dispositifs et services d'interagir de manière autonome pour atteindre les objectifs de production, les CPS sont une autre technologie importante utilisée pour ajouter de l'autonomie au processus de production. L'IoT est utilisé comme couche d'intégration pour soutenir les processus autonomes de coordination, de coopération et de collaboration, tandis que l'intégration de systèmes permet aux technologies de pointe de coopérer pour renforcer l'autonomie du processus de fabrication. L'analyse de grandes données et les interactions humain-ordinateur contemporaines sont également essentielles à l'Industrie 4.0 car elles abordent la diversité des acteurs et des données, respectivement, et permettent une intégration humaine transparente dans le processus de fabrication.

L'évaluation des défis de conception et de mise en œuvre dans les systèmes MM a révélé que l'IA a le potentiel de faire avancer ce sujet. En général, l'IA est une branche des sciences cognitives avec des programmes de recherche actifs dans des domaines tels que la robotique, l'apprentissage automatique et le traitement d'images. Les robots mobiles ont été améliorés tant au niveau du dispositif que du système grâce aux techniques et connaissances développées. Les techniques d'IA ont fait progresser la navigation des robots mobiles vers la conduite autonome et l'évitement d'obstacles, largement étudiés dans la littérature. Cependant, il existe un manque d'informations sur les MM capables de fonctionner dans des environnements cloud au niveau du système, offrant des services informatiques à la demande

et une assistance pour la prise de décision rationnelle tout au long du processus de planification avec les MM. Ainsi, la technologie MM a le potentiel d'aider les processus industriels à devenir plus flexibles et productifs. L'utilisation de Robots Mobiles Autonomes (AMR) pour le positionnement et la navigation intérieurs a été rendue possible par les récents progrès de l'IA et de la capacité informatique. Les AMR sont plus flexibles et adaptables que les AGV conventionnels, fonctionnant de manière autonome et avec une prise de décision décentralisée, d'où leur utilisation plus courante comme base des MM, bien qu'il existe différents types d'AMR. Plus compacts et agiles, ils peuvent s'intégrer plus efficacement dans les lieux de travail. Cela augmente la flexibilité de fabrication et les aide à répondre aux besoins du processus de production actuel. Les MM avec des plateformes AMR peuvent fonctionner aux côtés des humains comme des collègues robots et comme un système d'assistance.

À cet égard, l'un des principaux sujets de discussion est la sécurité et la communication avec les humains. Par exemple, les technologies portables comme la réalité augmentée (AR) permettent aux gens d'interagir avec les MM de manière plus intelligente, augmentant la collaboration et la coordination entre eux pour améliorer les processus de production, réduire les temps d'attente, augmenter la sécurité et l'efficacité des coûts, toutes caractéristiques importantes de l'Industrie 4.0. En général, la virtualisation et l'utilisation de modèles numériques, de simulations et de jumeaux numériques sont essentielles pour les MM. Ces nouvelles améliorations renforcent la nécessité pour les MM d'être équipés de systèmes de cybersécurité. Le domaine principal et fondamental pour atteindre toutes les caractéristiques mentionnées dépend de l'installation et de l'utilisation de capteurs appropriés et de la manière de recevoir les données de ces derniers, ainsi que de la communication avec d'autres composants pour accéder et échanger des informations et analyser les données instantanément.

En tant que technologie relativement nouvelle et en développement, les MM nécessitent davantage d'améliorations pour entrer et s'établir dans les systèmes de production à grande échelle. Mais la chose la plus importante pour atteindre un tel objectif est de réaliser des tests expérimentaux approfondis au niveau des systèmes réels, rarement mentionnés. Les principaux défis dans les rares cas où ce problème est mentionné concernent la sécurité et l'interaction homme-robot (HRI), la stabilité de la communication, la robustesse, la communication et la batterie. C'est pourquoi cette technologie se situe encore au niveau TRL 6 ou 7, à l'exception de cas particuliers, en termes de niveau de préparation. Par conséquent, il est crucial de se concentrer davantage sur les problèmes de batterie et d'énergie, ainsi que sur la stabilité et la fiabilité des technologies utilisées sur les MM dans les recherches futures

afin de pouvoir vraiment les déployer.

En abordant les défis de l'intégration transparente des MM dans des environnements de production complexes, la recherche actuelle et sa mise en œuvre pratique sont liées dans cette thèse. Le cadre proposé offre une solution complète qui prend en compte presque tous les aspects importants des systèmes de production existants, permettant une prise de décision précise et une efficacité opérationnelle améliorée.

La mise à niveau des systèmes de fabrication existants en utilisant des MM peut être un processus complexe et difficile. Il peut être difficile de modifier la configuration actuelle pour des systèmes de production matures lorsque tous les composants sont profondément intégrés dans une ligne de production. Différents composants du système de production prennent en charge une variété de protocoles de communication en fonction de leur configuration. Pour certains anciens ordinateurs, il n'y a même pas d'interfaces de communication disponibles. Lorsque le robot mobile détecte un obstacle, il s'arrête et choisit un chemin différent. Ainsi, un arrêt soudain du plan de production intégré pourrait avoir des effets sur l'ensemble du système. Cependant, le concept de systèmes cyber-physiques (CPS) dans le cadre de l'Industrie 4.0 a introduit une architecture distribuée qui permet l'intégration verticale, horizontale et de bout en bout. Cette intégration facilite la circulation d'informations complètes depuis le point initial de la chaîne d'approvisionnement jusqu'à la destination finale, qui est le client. De tels systèmes intégrés améliorent les processus de prise de décision dans les entreprises et augmentent la personnalisation des produits.

Le cadre d'intégration présenté offre une méthodologie structurée comprenant trois étapes clés. Tout d'abord, les "Objectifs et Applications" sont identifiés. Cette étape essentielle définit précisément les rôles et fonctions attendus du MM et garantit que leur inclusion s'aligne de manière transparente sur les objectifs de fabrication plus larges tout en traitant des complexités et des opportunités uniques de chaque système. En progressant à partir de cette étape, la phase "Préparation de l'infrastructure" est initiée. Ici, une pré-évaluation sert d'outil analytique critique et approfondit l'infrastructure actuelle. Cette évaluation détaillée met en évidence les forces et identifie les domaines d'amélioration. Sur la base de ces résultats, les paramètres d'infrastructure nécessaires sont suggérés pour créer une base favorable au déploiement du MM. En même temps, le MM optimal est sélectionné, garantissant sa compatibilité avec les objectifs définis et l'infrastructure modifiée. La dernière étape, la phase d'intégration, traite d'une méthode d'intégration complète. "L'intégration physique" garantit la coordination physique et

l'efficacité au travail des robots dans l'environnement de production. Ensuite, l'accent est mis sur la "communication intégrée", qui crée des chemins de transfert de données solides et des interactions entre le MM et les systèmes préexistants. Les performances des robots sont ensuite alignées sur les procédures actuelles et les interactions humaines dans l'aspect de "l'intégration fonctionnelle et opérationnelle". Enfin, "l'intégration numérique", le MM est intégré de manière transparente dans le tissu numérique de l'Industrie 4.0 en utilisant des outils avancés tels que les jumeaux numériques et l'analyse en temps réel des données.

B.22 Perspectives

Bien que de nombreux défis associés aux MM et à leur inclusion harmonieuse existent, cette thèse n'a pas pu tous les aborder en raison de contraintes de ressources et de temps. Néanmoins, quelques-uns de ces aspects négligés seront brièvement mis en lumière dans la suite.

B.22.1 Problème de dimensionnement de flotte

Le problème de dimensionnement de flotte est un type de problème d'optimisation qui implique de déterminer le nombre optimal de véhicules ou d'autres ressources à allouer à une flotte afin de répondre à la demande pour un service tout en minimisant les coûts. Ce problème est souvent rencontré dans le transport, la logistique et d'autres industries où il est nécessaire de gérer une flotte de véhicules ou d'autres ressources.

Pour résoudre le problème de dimensionnement de flotte, un modèle mathématique est généralement développé qui prend en compte des facteurs tels que la demande pour le service, le coût d'exploitation de la flotte et d'autres contraintes. Le modèle est ensuite résolu à l'aide d'algorithmes d'optimisation pour déterminer le nombre optimal de véhicules ou de ressources à allouer à la flotte.

Il existe de nombreuses approches différentes pour résoudre le problème de dimensionnement de flotte, et la méthode spécifique utilisée dépendra des circonstances spécifiques et des contraintes du problème en question. Certaines méthodes courantes pour résoudre le problème de dimensionnement de flotte incluent la programmation linéaire, la programmation entière et les algorithmes heuristiques.

Un modèle mathématique représentatif d'un problème réel de dimensionnement de flotte qui nous guide pour trouver le nombre optimal de MM pour un système est présenté ci-dessous.

Hypothèses

Comme discuté dans la section 3.3.1.1, trois parties opérationnelles distinctes sont considérées pour un système de fabrication : le secteur des stocks, l'atelier et le centre de distribution. Le secteur des stocks est responsable du stockage des matières premières, ainsi que des travaux en cours (WIP), des pièces défectueuses et des produits finaux. Les opérations de production sont considérées dans le segment de l'atelier, tandis que l'emballage du produit final et sa préparation pour la distribution sont attribués au département de distribution. Dans chaque département, des opérations spéciales ont été définies. De plus, des opérations logistiques sont nécessaires entre chacun des segments. Les MMs sont appliqués non seulement pour les déplacements de matériaux, mais aussi pour effectuer certaines tâches à valeur ajoutée. Définissons un ensemble de tâches pour le robot collaboratif (K), dans ce modèle, en supposant l'existence de différentes stations représentées par les indices i et j . Le MM peut se déplacer d'une station à une autre. En fonction de la distance entre la station i et la station j (d_{ij}), et de la vitesse de déplacement moyenne du MM (\bar{v}_{ij}), il est possible de déterminer le temps de déplacement entre les stations (t_{ij}). Pour un robot mobile, il est possible de définir différentes zones avec des limitations de vitesse spéciales. Ainsi, une vitesse moyenne est nécessaire pour améliorer la précision. Lorsque le robot mobile arrive à un emplacement, le manipulateur peut avoir une tâche spéciale à effectuer. Le temps nécessaire pour que le bras termine la tâche k est indiqué par T_k . P_{ijk} représente la probabilité que le robot se déplace d'une certaine station (i) à une autre station (j) dans le but de réaliser la tâche k . Le nombre de déplacements de i à j , effectuant la tâche k , est représenté par f_{ijk} . Les variables introduites nous aident à découvrir le temps opérationnel total. H est utilisé pour montrer les heures de travail du système de production tandis que UL montre la capacité du numéro de MM L en fonction du processus de charge de la batterie et de ses temps perdus.

Notation

- P_{ijk} : La probabilité de passer de la station i à j , en effectuant la tâche k
- F_{ijk} : Le nombre de déplacements de la station i à j , en effectuant la tâche k
- t_{ij} : Temps de déplacement entre la station i et j
- d_{ij} : La distance entre la station i et j
- \bar{v}_{ij} : La vitesse moyenne de déplacement de i à j
- T_k : Temps pour le bras pour effectuer la tâche k
- H : Les heures de travail
- UL : Le pourcentage d'utilisation du MM numéro L
- N : Nombre de MMs

Modèle

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m P_{ijk} \cdot f_{ijk} \cdot (t_{ij} + T_k)}{H \cdot UL} = \frac{\text{Temps opérationnel total}}{\text{Temps disponible de MM } L} \quad (\text{B.1})$$

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{\bar{v}_{ij}} \quad (\text{B.2})$$

B.22.2 Allocation des tâches

Afin de produire une solution d'automatisation personnalisable, la flexibilité devrait généralement être privilégiée lors de la conception de la technologie MM. Cependant, concevoir un MM universel capable de gérer toutes les applications industrielles n'est pas pratique. Avoir une configuration de MM différente pour chaque opération est également peu pratique. Ainsi, pour maximiser l'efficacité et la productivité du système MM, un équilibre entre la flexibilité et la spécialisation doit être établi. Cependant, il est utile de fournir un modèle mathématique pour trouver le nombre et le type d'applications qui seraient mieux réalisées par un MM avec un paramétrage spécifique.

Un modèle mathématique est développé pour déterminer quelles opérations seraient mieux réalisées par un MM plutôt que par la méthode traditionnelle déjà mise en œuvre dans le système de production. Ce modèle aide à prendre des décisions basées sur le temps opérationnel. Outre le temps d'opération, un coefficient est défini pour prendre en compte l'impact important de chaque opération en ce qui concerne les aspects de l'Industrie 4.0. Les hypothèses et les notations sont fournies ultérieurement.

Hypothèses

On considère qu'il y a un seul MM dans un système de production. Au lieu d'un espace continu, des postes de travail spéciaux, des stations d'accueil ou des inventaires ont été définis, et on considère que le MM serait toujours dans l'une de ces zones et que toute opération requise devrait être effectuée dans l'une de ces zones spéciales.

Notations

- Les stations sont représentées par les indices i et j ; $i, j = \{1, 2, \dots, n\}$
- Les tâches sont indexées par k ; $k = \{1, 2, \dots, K\}$
- d_{ij} : La distance entre la station i et j ;
- \bar{v}_{ij} : La vitesse moyenne de déplacement de i à j ;
- t_{ij} : Le temps de déplacement de i à j ;
- T_k : Le temps pour le bras du MM pour effectuer la tâche k ;
- T'_k : Le temps pour le système traditionnel pour effectuer la tâche k sans le MM;
- P_i : La probabilité que le MM soit à la station i lorsqu'il est appelé pour effectuer l'opération k à la station j ;
- α_k : Le coefficient de l'Industrie 4.0 qui indique dans quelle mesure la tâche k est importante pour disposer d'un système de production fiable 4.0;

Variable de décision :

$$O_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{si le MM effectue l'opération } k \text{ à la station } j \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Fonction objective :

$$\text{Minimiser } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K O_{kj} \left(T_k + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i t_{ij} \right) + (1 - O_{kj}) T_k' \alpha_k$$

Calcul du temps :

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{\bar{v}_{ij}}$$

B.22.3 Évaluation de la flexibilité

Évaluer la flexibilité post-intégration du système sert d'outil de diagnostic pour assurer l'effet de l'intégration des MM dans les systèmes de production. L'utilisation de MM plutôt que de convoyeurs fixes ou de véhicules automatiques guidés (AGV) restreints à des lignes et zones spéciales devrait améliorer la flexibilité de la manipulation des matériaux. Pour évaluer cette amélioration, divers composants pourraient être manipulés par des MM, et le temps nécessaire pour passer d'un type de pièce à l'autre pourrait être une mesure utile.

Dans le cas de la flexibilité de la machine, les MM pourraient être utiles dans deux scénarios différents : 1. En considérant le MM comme la machine, son outil pourrait être changé en raison de la maintenance ou pour le configurer pour une autre application. 2. En considérant le MM comme une assistance dans le remplacement des outils d'autres machines. Dans chaque cas, le temps et les efforts nécessaires pour le remplacement pourraient être mesurés. De plus, en particulier pour le cas 1, à long terme, la fréquence du besoin de changer la configuration du MM pourrait être mesurée et évaluée par rapport aux objectifs du système.

La flexibilité du routage est principalement liée au remplacement des MM par d'autres machines ou robots en cas de panne ou de maintenance. Le nombre supplémentaire de façons dont un produit peut être fabriqué grâce à l'introduction des MM dans le système est une manière de mesurer ce type de flexibilité. Le temps nécessaire pour remplacer le MM par les machines d'origine, couplé à la différence de durée d'exploitation entre la condition d'origine et le scénario où le MM effectue la tâche, contribue également à cette évaluation.

Selon [153], la flexibilité du volume du système est atteinte lorsqu'il reste rentable même à des volumes de production minimaux. Cette adaptabilité est renforcée lorsque le système intègre des machines multitâches, évite une disposition de processus unique, utilise un transport de matériel

avancé et possède une adaptabilité de routage pour répondre de manière transparente aux diverses demandes opérationnelles. Les MM sont des machines multitâches spécialisées dans la manipulation intelligente des matériaux qui peuvent être attendues pour améliorer ce type de flexibilité.

Résumé : Cette thèse présente un cadre pour l'intégration de manipulateurs mobiles (MM), conçus comme un nouveau Système Cyber-Physique, dans les processus de fabrication existants alignés avec l'Industrie 4.0. Compte tenu de l'intérêt croissant et du manque de recherche sur les MMs, le cadre vise à améliorer l'adaptabilité dans les environnements de fabrication. Il comprend trois étapes : (1) "Objectifs et Applications", où les rôles des MMs sont définis en accord avec les objectifs de fabrication ; (2) "Préparation de l'Infrastructure", impliquant une évaluation de l'infrastructure actuelle pour le déploiement des MMs ; et (3) le processus d'intégration proprement dit, se concentrant sur l'intégration physique, communicationnelle, fonctionnelle et opérationnelle, en exploitant des outils comme les jumeaux numériques et l'analyse de données en temps réel. Le cadre repose sur une approche architecturale modulaire et orientée service, en ligne avec les principes de l'Industrie 4.0. Cette conception offre flexibilité, évolutivité et facilité de modification, répondant aux besoins dynamiques des environnements industriels modernes et assurant une interaction efficace entre les composants du système.

Mots clés : Industrie 4.0 ; Systèmes Cyber-Physiques ; Manipulateurs Mobiles ; Cadre d'Intégration

Abstract : This thesis introduces a framework for integrating mobile manipulators (MMs), envisioned as a novel Cyber-Physical System (CPS), into existing Industry 4.0-aligned manufacturing processes. Given the growing interest and research gap in MMs, the framework aims to enhance adaptability in manufacturing settings. It comprises three stages : (1) "Objectives and Applications," where the MM's roles are defined in line with manufacturing goals ; (2) "Infrastructure Readiness," involving an assessment of current infrastructure for MM deployment ; and (3) the actual integration process, focusing on physical, communicational, functional, and operational integration, leveraging tools like digital twins and real-time data analysis. The framework is based on a modular, service-oriented architectural approach, aligning with Industry 4.0 principles. This design provides flexibility, scalability, and ease of modification, catering to the dynamic needs of modern industrial environments and ensuring efficient system-component interaction.

Keywords : Industry 4.0 ; Cyber-physical systems ; Mobile manipulators ; Integration framework