PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Design d'un manipulateur robotique à architecture anthropomorphique
Auteur: Author:	Martin Leroux
Date:	2017
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Leroux, M. (2017). Design d'un manipulateur robotique à architecture anthropomorphique [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/2533/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/2533/
Directeurs de recherche: Advisors:	Maxime Raison, & Sofiane Achiche
Programme: Program:	Génie mécanique

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DESIGN D'UN MANIPULATEUR ROBOTIQUE À ARCHITECTURE ANTHROPOMORPHIQUE

MARTIN LEROUX
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
MAI 2017

© Martin Leroux, 2017.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DESIGN D'UN MANIPULATEUR ROBOTIQUE À ARCHITECTURE ANTHROPOMORPHIQUE

présenté par : LEROUX Martin
en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. SAUSSIÉ David, Ph. D., président
M. RAISON Maxime, Doctorat, membre et directeur de recherche
M. ACHICHE Sofiane, Ph. D., membre et codirecteur de recherche
Mme BLOUIN Martine, M.Sc.A., membre

REMERCIEMENTS

Pour commencer, j'aimerais remercier profondément les membres de mon comité d'encadrement. D'abord, un très grand merci à mon directeur de recherche, Maxime Raison, professeur au Département de Génie Mécanique à Polytechnique Montréal et titulaire de la Chaire de recherche en génie de la réadaptation pédiatrique, dont l'incroyable enthousiasme et la motivation démesurée m'a encouragé à constamment mettre plus d'efforts au travail, à me surpasser, mais surtout à apprendre à bien reconnaître la valeur de mes réussites. Un merci tout aussi grand va à mon codirecteur Sofiane Achiche, professeur au Département de Génie Mécanique à Polytechnique Montréal, qui était toujours présent pour répondre à mes questions et mes inquiétudes et qui savait toujours détendre l'atmosphère pour diminuer la pression qui peut parfois être apportée par le travail. Mille mercis à vous deux pour votre patience et votre temps, c'est grandement grâce à vous si je conserverai de bons souvenirs de ma maîtrise et si j'en sors avec l'intime conviction d'avoir accompli quelque chose de bien.

Un autre merci particulier va à Ilmar Santos, professeur au Département de Génie Mécanique à l'Université Technique du Danemark, pour m'avoir accueilli dans ses locaux et offert l'incroyable opportunité de faire de la recherche à l'étranger. Merci aussi aux autres étudiants, Julie Timsit, Régis Ngoufo, George Popescu et Radu Popescu ayant contribué au projet dans le cadre de projets intégrateur et de stages grâce à qui j'ai déjà eu la chance de voir la portée potentielle de mes travaux.

Je suis également reconnaissant envers les organismes subventionnaires ayant apporté leur soutien financier au projet, notamment le programme MÉDITIS, supporté par le programme FONCER du CRSNG, le programme de Bourses de recherche aux cycles supérieurs du CRSNG, ainsi que le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies. Merci également à Polytechnique Montréal de m'avoir offert du financement et l'opportunité de travailler dans un milieu stimulant.

Enfin, j'aimerais sincèrement remercier mes proches pour leur soutien constant tout au long de mon parcours universitaire. Un merci spécial à mon grand-père qui s'est toujours montré intéressé à mon travail et à qui ma réussite a toujours semblé tenir encore plus à cœur qu'à moi-même ; ça m'a fait plaisir de travailler fort pour que tu sois fier de moi.

Encore une fois, toute ma gratitude à tous et à toutes.

RÉSUMÉ

Les robots à architecture anthropomorphique, c'est-à-dire inspirée des mécanismes du corps humain, sont des outils qui pourraient être d'une grande utilité dans le domaine de la robotique de réadaptation et d'assistance étant donné l'aspect intuitif, relativement à leur fonctionnement et leur comportement, que leur apporte leur forme familière. Toutefois, les robots anthropomorphiques actuellement existants sont généralement développés dans le cadre d'applications particulières et ne sont par conséquent pas appropriés pour un transfert vers le domaine de la robotique d'assistance et de réadaptation. Par conséquent, il n'existe pas de plateforme de développement robotique permettant le développement d'applications mettant à profit au maximum une architecture biomimétique pour des usagers sans formation en robotique comme les cliniciens en réadaptation et les bénéficiaires de robots d'assistance.

Dans ce contexte, l'objectif de ce mémoire est de concevoir une plateforme robotique à architecture anthropomorphique suivant le plus fidèlement possible l'architecture du bras humain pour maximiser l'apport intuitif de la forme familière de l'appareil pour son fonctionnement et son interaction avec son environnement. Particulièrement, un effort est appliqué pour inclure dans le mécanisme la structure à deux os de l'avant-bras afin de rendre possible une reproduction réaliste du mouvement de pronation-supination du bras, le mouvement le plus complexe du membre supérieur puisqu'il implique une boucle cinématique fermée et de nombreux joints passifs.

En premier lieu, un modèle biomécanique du membre supérieur a été choisi pour répondre à la problématique, puis ses caractéristiques principales ont été spécifiées. La chaîne cinématique du modèle biomécanique a par la suite été traduite en chaîne cinématique pour un robot, en s'assurant que chacun des sous-mécanismes reproduise bien les caractéristiques soulignées du modèle. Ces mécanismes ont permis de faire les plans entier du manipulateur robotique à l'aide d'un logiciel de dessin assisté par ordinateur. Afin de choisir les actionneurs nécessaires au fonctionnement du robot, une simulation de suivi de trajectoire avec contrôle par couple pré-calculé a été élaborée. Les modèles cinématiques et dynamiques du bras, étant nécessaires à la simulation, ont été développés. Enfin, un prototype de la plateforme a été conçu par impression 3D. En comparant les plages angulaires accessibles aux différents joints du mécanisme à celles des joints du modèle biomécanique, il a été déterminé que le bras pourrait reproduire toute la gamme des mouvements humains pour laquelle la position de l'épaule est près de la position de repos.

Cette plateforme robotique rend possible le développement de futures applications en robo-

tique d'assistance et de réadaptation pour lesquelles la reproduction précise du mouvement du bras humain est un atout. On pourra notamment étudier le critère mathématique d'optimisation permettant de faire la planification de trajectoire la plus anthropomorphique possible. D'un autre côté, l'architecture développée est compatible avec de nombreux modes d'interfaçage homme-machine comme la réalité augmentée, le suivi du regard et le contrôle manuel qui pourront être utiles dans différents scénarios communs de robotique d'assistance.

ABSTRACT

Bio-inspired robots, more specifically, anthropomorphic robots, would be very suitable tools for assistance and rehabilitation robotics because they are, by design, very familiar and intuitive-looking both visually and in their behavior, which is ideal in a field where most users, such as patients and clinicians, do not possess an advanced knowledge of robotics. However, previously developed anthropomorphic robots are not well-suited for a direct use in such applications since they were generally designed for other industrial applications which makes them cumbersome and complex to use. It is not ideal for use in assistance robotics. Moreover, none of them actually correctly mimics the two-bones structure of the arm-forearm complex of the human arm and thus the designs are not biofidelic. Therefore, there is currently no robotic development platform dedicated to anthropomorphic robotics for the field of rehabilitation and assistance.

Given this context, the objective of this study is to design the first robotic development platform with an anthropomorphic architecture which reproduces as best as possible the biomechanics of the human upper-limb for intuitive control and interaction. Specifically, the mechanism of the robotic arm will include the two-bones structure of the forearm for an accurate replication of the motion of pronation-supination, which is the most intricate motion of the arm.

First, a biomechanical model of the upper-limb was chosen to fit the objective of the project and its key characteristics were analysed. This model was then translated into a robotic kinematic chain whose sub-mechanisms mimic the highlighted characteristics of the biomechanical model. The designed mechanisms were then included in a complete computer-assisted drawing of the robot. The choice of actuators on the robot was made based on the results of a path-following by computed-torque simulation of the robot, which required the kinematic and dynamic models of the robot to be developed. Finally, a physical prototype of the robot was built using rapid prototyping. Comparing the range of motion of each of its actuators, it appeared that the robot arm should be able to imitate accurately any human motion of the arm for which the shoulder is close to its resting position.

Applications and research in rehabilitation and assistance robotics where accurate reproduction of the human motion of the arm is necessary. For example, determining the mathematical optimization criterion for humanlike path-planning can now be performed with the designed robot. The architecture of the robot is also compatible with many human-machine interface paradigms such as augmented reality, eye tracking and manual control, which can be useful

in various scenarios in the field of robotics assistance.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS III

RÉSUMÉ IV

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VIII

LISTE DES TABLEAUX XI

LISTE DES FIGURES XII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XIV

LISTE DES ANNEXES XV

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE 3
2.1 Robotique 3
2.1.1 Robots d'assistance 3
2.1.2 Robots anthropomorphiques 6
2.1.3 Mécanismes robotiques 11
2.1.4 Robots redondants 15
2.2 Anatomie fonctionnelle du membre supérieur 16
2.2.1 L'épaule 16
2.2.2 Le coude 18
2.2.3 Mécanismes d'orientation de la main 18
2.2.4 Intégration des modèles [97] 22
2.3 Modélisation multi-corps 24
2.3.1 Modélisation des boucles cinématiques 25
2.3.2 Modélisation dynamique 27

CHAPITRE 3 RATIONNELLE DU PROJET 31
3.1 Résumé de la problématique 31
3.2 Objectif général 32

3.3 Objectifs spécifiques et méthodologie générale du projet 32

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : DESIGN, MODELING AND DEVELOPMENT OF A BIOFIDELIC ROBOTIC MANIPULATOR 34
4.1 Introduction 34
4.2 Mechanical design 36
4.2.1 Biomechanical model 36
4.2.2 Mechanism 38
4.3 Kinematics 42
4.3.1 Direct Kinematics 42
4.3.2 Inverse Kinematics 44
4.4 Dynamic modelling 46
4.4.1 Inverse Dynamics 46
4.4.2 Direct Dynamics 48
4.5 Control Strategy 49
4.6 Simulation 51
4.6.1 Simulation parameters 51
4.6.2 Control results 52
4.6.3 Required actuator strength 54
4.7 Physical prototype of the robotic manipulator 54
4.8 Conclusion 57

CHAPITRE 5 MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES 63
5.1 Résumé du travail accompli 63
5.2 Résultats complémentaires de la simulation de suivi de trajectoire 64
5.2.1 Suivi de trajectoire en orientation 64
5.2.2 Vitesses et accélérations 64
5.3 Construction du prototype 66
5.3.1 Prototypage rapide 66
5.3.2 Personnalisation des pièces et actionneurs 68
5.3.3 Assemblage 70

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE 76
6.1 Synthèse de l'article 76
6.2 Discussion des résultats supplémentaires 77
6.2.1 Suivi de trajectoire en orientation 77
6.2.2 Vitesses et accélérations 78

6.3 Limites et perspectives 79
6.3.1 Design 79
6.3.2 Modélisation 81
6.3.3 Contrôle 82
6.3.4 Trajectoire 83
6.3.5 Interface homme-machine 84

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 85

ANNEXES 99

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Caractéristiques de modèles biomécaniques du membre supérieur . . .	24
Tableau 4.1	Characteristics of the biomechanical model to be mimicked by the mechanism . . .	37
Tableau 4.2	Comparison between the robot and biological joint ranges . . .	57
Tableau 5.1	Remarques concernant l'impression de pièces du prototype . . .	69
Tableau 6.1	Améliorations suggérées pour un produit fini . . .	81
Tableau A.1	Paramètres de la simulation . . .	101

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Station de travail du robot MASTER(Photo tirée de [25])	5
Figure 2.2	Robot MOVAID	6
Figure 2.3	Robots d'assistance MANUS et JACO (Images tirées de [5] et [6])	7
Figure 2.4	Imitation en temps réel de mouvements humains par l'humanoïde Nao (Image tirée de [12])	9
Figure 2.5	Robot CDRA (Photo tirée de [16])	10
Figure 2.6	Robot KIT (Image adaptée de [19])	11
Figure 2.7	Robots parallèles communs	13
Figure 2.8	Structure osseuse du membre supérieur (Image adaptée de [86])	17
Figure 2.9	Structure du joint gléno-huméral (Image adaptée de [89])	18
Figure 2.10	Mouvements de l'épaule (Image adaptée de [96])	19
Figure 2.11	Structure osseuse et mécanisme du coude (Image adaptée de [97])	20
Figure 2.12	Mouvement de flexion/extension du coude	21
Figure 2.13	Modèle de boucle cinématique de l'avant-bras de Kecskemethy et Weinberg incorporant le *carrying-angle*, la translation de l'ulna et la chaîne cinématique responsable du mouvement de PS (Image tirée de [111])	22
Figure 2.14	Mouvement de pronation/supination (Image adaptée de [114])	23
Figure 2.15	Mouvements du poignet	24
Figure 2.16	Exemples de structures arborescentes considérées en modélisation multicorps (Image adaptée de [119])	25
Figure 2.17	Méthodes d'ouverture des boucles cinématiques et illustration des variables des équations 2.3-2.4 (Image adaptée de [119])	27
Figure 4.1	Portion of the biomechanical model chosen for the architecture of the robot [21]	38
Figure 4.2	Rendered CAD drawing of the robot	39
Figure 4.3	Design of the shoulder joint - The agile eye	40
Figure 4.4	Elbow and proximal side of the PS loop mechanism	41
Figure 4.5	Wrist and distal side of the PS loop mechanism	43
Figure 4.6	Bloc diagram of the simulation	52
Figure 4.7	Simulated trajectory of the robot end-effector	53
Figure 4.8	Angular trajectory error for each motor	54
Figure 4.9	Torque applied to each motor during trajectory	55
Figure 4.10	Physical prototype of the mechanism	56

Figure 5.1	Comparaison des angles d'Euler obtenus pour l'orientation de l'effecteur avec l'orientation désirée pendant la simulation	65
Figure 5.2	Vitesse de l'effecteur pendant la trajectoire	66
Figure 5.3	Accélération de l'effecteur pendant la trajectoire	67
Figure 5.4	Vitesse angulaire de l'effecteur pendant la trajectoire	68
Figure 5.5	Ajustement des pièces en fonction des dimensions des moteurs	70
Figure 5.6	Design actuel de l'effecteur de l'agile eye	71
Figure 5.7	Identification des pièces de la base du robot	72
Figure 5.8	Identification des pièces de l'agile eye	73
Figure 5.9	Identification des pièces du coude	74
Figure 5.10	Identification des pièces du poignet	74
Figure 5.11	Schématisation du circuit électronique permettant l'alimentation et le contrôle du robot	75
Figure A.1	Chaîne cinématique à modéliser sur Robotran	100
Figure B.1	Principaux paramètres géométriques définissant un MPS (Image adaptée de [69])	104
Figure B.2	Paramètres géométriques du joint rotatif de l'agile eye	105

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

TMS	Troubles musculo-squelettiques
DDL	Degrés de liberté
FE	Flexion/extension
ISB	Société Internationale de Biomécanique
IRM	Imagerie par Raisonnance Magnétique
PS	Pronation/Supination
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DRC	DARPA Robotics Challenge
MPS	Manipulateurs Parallèles Sphériques
PPP	Principe des Puissances Potentielles
PLA	Acide Polyacitique
IMSD	International Multibody System Dynamics

LISTE DES ANNEXES

Annexe A PROGRAMMATION DE LA SIMULATION DE SUIVI DE TRAJECTOIRE 99

Annexe B GÉOMÉTRIE DE L'*AGILE EYE* 104

Annexe C ÉTAPES SUGGÉRÉES VERS UN PRODUIT FINI 107

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les troubles musculo-squelettiques (TMS) comme la paralysie cérébrale et la dystrophie musculaire sont des troubles qui affectent le mouvement et la coordination du corps des personnes atteintes [1]. Il s'agit des causes de handicaps physiques les plus répandues, atteignant plus de 0.2% des nouveaux nés et plus de 50,000 Canadiens [2] seulement pour la paralysie cérébrale. La plupart de ces troubles sont incurables et mettent les personnes atteintes en situation permanente de difficulté fonctionnelle les menant à un degré variable de manque d'autonomie pouvant aller jusqu'à la dépendance quasi totale envers une tierce personne pour accomplir les tâches quotidiennes [3]. Ces limitations fonctionnelles ont un impact négatif important sur l'implication sociale, le moral et la qualité de vie des patients [4].

Les bras robotiques d'assistance [5] font partie des solutions technologiques développées afin d'améliorer l'autonomie chez les personnes souffrant de TMS ou de dystrophie musculaire. Au Québec, par exemple, la compagnie Kinova développe les bras JACO [6] et MICO, qui sont des bras robotiques développés selon les normes de sécurité pour les outils de réadaptation et qui peuvent être attachés au fauteuil motorisé d'un patient. Celui-ci peut alors le contrôler et s'en servir afin d'accomplir des tâches de la vie quotidienne qui lui nécessiteraient autrement la présence d'un aidant naturel. Bien que coûteuses, il a été montré que ces technologies ont un impact fonctionnel extrêmement important chez les patients [7], ce qui permettrait de réduire le temps nécessaire des aidants naturels jusqu'à 41% [8]. Cependant, les résultats de [8] indiquent également que plusieurs tâches quotidiennes demeurent extrêmement longues à accomplir et certaines sont même toujours irréalisables. Le contrôle difficile de ces robots pour l'accomplissement des tâches peut rendre pénible leur usage et ultimement diminuer l'appropriation de la technologie chez les patients, parfois jusqu'à son abandon.

D'un autre côté, le domaine de la robotique a mis de l'avant dans les dernières années des approches bio-fidèles, c'est-à-dire inspirées de la nature [9]. L'idée derrière ces designs consiste à imiter en termes de structure les mécanismes existants optimisés par de longues années d'évolution afin d'accomplir certaines tâches particulières avec une efficacité accrue, en termes d'énergie, de performance ou d'autres critères [10]. En termes d'applications concrètes, une branche particulière de la robotique bio-inspirée, soit la robotique anthropomorphique - imitant les mécanismes du corps humain, a reçu davantage d'attention puisqu'elle permet non seulement de reproduire les capacités du corps humain, mais en plus elle facilite l'interaction avec ces robots qui agissent d'une manière en apparence plus naturelle et intuitive [11]. Ces robots ont notamment trouvé déjà un usage en télémanipulation [12], dans les espaces de

travail partagés avec des travailleurs humains [13] et comme robots sociaux [14].

Il apparaît donc évident que le domaine de la robotique de réadaptation et d'assistance pourrait grandement bénéficier d'outils développés avec une architecture anthropomorphique, puisque les usagers de la technologie sont des patients, des cliniciens ou d'autres types de travailleurs qui n'ont pas de formation avancée dans le domaine de la robotique. Ainsi, ils profiteraient de l'aspect intuitif apporté par l'architecture biomimétique pour le contrôle ainsi que pour l'interaction avec l'appareil. Cependant, il semble qu'il n'existe actuellement aucune architecture de robot anthropomorphique qui soit parfaitement approprié à un usage comme robot d'assistance ou en réadaptation. Certains sont trop massifs [15], d'autres ont des mécanismes trop complexes et fragiles [16], plusieurs sont spécifiquement conçus comme des humanoïdes entiers [17]–[19], par opposition à un outil partiel comme un bras, pour ne mentionner qu'une partie des problèmes. Il faut aussi mentionner qu'aucun modèle de bras robotique dit anthropomorphe ne respecte l'architecture à deux os de l'avant-bras pour simplifier les mécanismes. Cela fait en sorte que les mouvements du robot ne sont plus automatiquement naturels. Avant le développement d'outils spécifiques aux robots de réadaptation et d'assistance, il sera nécessaire d'avoir accès à un support robotique sur laquelle développer ces-dites applications qui respecte l'anatomie du bras humain.

Dans ce contexte, ce mémoire a pour objectif de développer une plateforme robotique anthropomorphique de développement pour des applications en robotique de réadaptation et d'assistance. Plus spécifiquement, l'idée consiste à concevoir une architecture de robot anthropomorphique qui imite au mieux possible l'architecture du corps humain afin de maximiser le lien intuitif entre le fonctionnement du robot et celui d'un bras humain.

Le Chapitre 2 présente le contexte théorique du projet, comportant les grands aspects du projet, soit la biomécanique du membre supérieur, la robotique et la modélisation. Au Chapitre 3 sont expliqués plus en détails la problématique et les objectifs du projet. Les résultats principaux de ce mémoire sont présentés au Chapitre 4 dans un article scientifique soumis au *Journal of mechanisms and robotics*. Le Chapitre 5 présente des détails de méthodologies et des résultats complémentaires qui ne sont pas inclus dans l'article. Les résultats du projet sont présentés aux Chapitres 4-5 et une discussion sur leurs perspectives est présentée Chapitre 6. Finalement, le Chapitre 7 présente la conclusion de ce mémoire.

CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE

La présente revue des connaissances a pour but de mettre en lumière les notions théoriques essentielles au développement d'une plateforme robotique à architecture anthropomorphique pour un usage en robotique d'assistance. Dans cette optique, ce chapitre explore d'abord les différents paradigmes structurels en robotique après avoir discuté des solutions technologiques existantes en robotique d'assistance. Par la suite, la littérature sur l'anatomie fonctionnelle du membre supérieur est analysée afin d'en ressortir les caractéristiques nécessaires pour concevoir un bras robotique respectant la biomécanique du corps humain. Pour finir, ce chapitre présente différentes stratégies de modélisation permettant d'effectuer les calculs associés aux mouvements de systèmes multi-corps tels que ceux d'un robot rigide.

2.1 Robotique

Les prochaines sections présentent les connaissances nécessaires pour la conception d'un robot d'assistance à architecture anthropomorphique. D'abord, les solutions existantes en robotique d'assistance sont examinées. Puis, les technologies disponibles en robotique anthropomorphique sont présentées. Enfin, des notions importantes relatives aux robots parallèles et aux robots redondants sont présentées puisque ces robots peuvent être partie intégrante de n'importe quel système robotique.

2.1.1 Robots d'assistance

Les robots d'assistance en réadaptation sont une technologie relativement nouvelle qui consiste en un bras robotique qui permet à des patients avec des limitations fonctionnelles importantes d'accomplir de façon autonome des tâches quotidiennes. Il existe une large gamme d'aides techniques robotiques [20], mais la présente étude se concentre particulièrement aux manipulateurs robotiques fixés aux fauteuils motorisés qui peuvent être utilisés dans des environnements non-structurés. Bien que les moyens techniques pour la création de bras robotiques agiles et précis existent depuis longtemps [21], leur application en réadaptation est un développement très récent [22]. Il est d'ailleurs intéressant de mentionner qu'il s'agit d'une technologie tellement nouvelle dans son usage qu'il n'existe actuellement pas de normes ou de réglementation imposées par des instances gouvernementales indiquant des paramètres de performances ou des limitations de sécurité, contrairement à la plupart des autres technologies médicales.

Maheu et al.[8] ont démontré la pertinence d'un outil d'assistance pour les individus aux prises avec des limitations fonctionnelles importantes, soulignant notamment qu'ils pourraient permettre de potentiellement réduire de 41% le temps de soins nécessaire à fournir par un aidant naturel par rapport à l'absence de robot d'assistance. Néanmoins, une étude menée par Picone et al. [23] indique que plusieurs tâches quotidiennes, certes rendues possibles, demeurent très longues à accomplir malgré l'aide technique apporté par un appareil d'assistance, et ce même pour des utilisateurs sains, puisqu'il est difficile de faire produire au robot un mouvement désiré. Cela est rendu davantage problématique par le fait que les usagers habituels des robots d'assistances ont généralement des troubles moteurs qui réduisent leur endurance pour accomplir des tâches [24]. Il existe actuellement plusieurs manipulateurs d'assistance, cette section en présentera quelques uns pour en relever les caractéristiques principales.

MASTER [25]

Le robot MASTER a été développé par la Commission Française de l'Énergie Atomique et a pour objectif d'améliorer l'autonomie et la qualité de vie des personnes atteintes de quadraplégie dans un environnement domestique. Il s'agit d'une station de travail complète permettant de contrôler un robot six-axes pouvant être déplacé sur un rail. Le robot est équipé d'une pince permettant de manipuler des objets de son environnement. Il est illustré sur la Figure 2.1.

À cause de son choix de clientèle , le robot MASTER possède un nombre important de limitations. Premièrement, tel que mis en évidence sur la Figure 2.1, il nécessite un aménagement élaboré et complet de l'environnement où il est sensé être utilisé. Cet aménagement invasif est coûteux, nécessite beaucoup d'espace et serait fastidieux à adapter en cas de modification de l'environnement. De plus, il ne répond pas à l'attrait principal mentionné précédemment pour les assistants robotiques, c'est-à-dire qu'ils peuvent être utilisés dans des environnements non contrôlés. Deuxièmement, les tâches accomplies par le MASTER doivent être entièrement pré-programmées, ce qui rend encore une fois la possible modification de l'environnement très difficile et impose notamment de penser à l'avance à toutes les tâches que l'usager pourra vouloir accomplir quotidiennement. Pour pallier ce problème, MASTER possède un contrôle manuel que les auteurs présentent dans [25] tout en mentionnant difficile à contrôler même pour une personne sans handicap.

MOVAID [15]

Le robot MOVAID est un robot d'assistance développé par le programme TIDE de la Comission Européenne pour l'assistance des personnes âgées ou handicapées. Ses concepteurs

Figure 2.1 Station de travail du robot MASTER(Photo tirée de [25])

le décrivent comme un robot anthropomorphique, bien qu'il n'ait d'humanoïde que le fait qu'il possède une épaule, un coude et un poignet. Il n'est pas conçu pour être attaché sur un fauteuil motorisé, mais il est conçu avec une base le rendant mobile, lui offrant ainsi les mêmes avantages théoriques de portabilité et flexibilité. C'est un bras robotique de 8 DDL avec une pince possédant elle-même 2 DDL, le tout fixé sur un robot mobile et accompagné de différents senseurs pour interagir avec l'environnement. Celui-ci est illustré sur la Figure 2.2.

Le MOVAID a pour inconvénient principal le fait qu'il soit massif, ce qui, en plus d'augmenter les risques d'accident pour les personnes qui interagissent avec l'appareil, diminue largement son aspect portatif qui serait utile pour un usage quotidien. La validation de l'usage du robot également rapportée dans [15] indique également la nécessité pour le robot d'être accompagné de systèmes complémentaires comme la télématique et la domotique externes au robot.

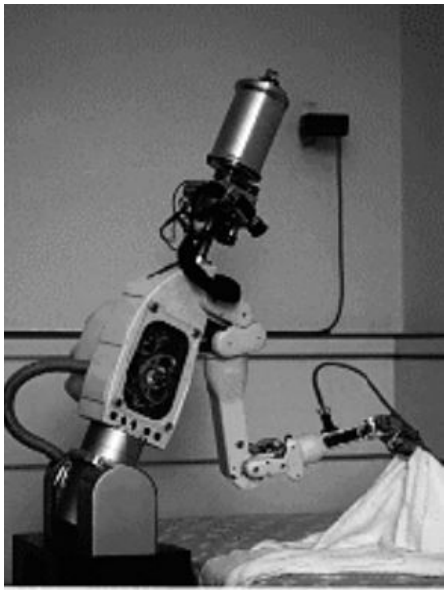

Figure 2.2 Robot MOVAID

MANUS [20] et JACO/MICO[6]

Les robots MANUS, développé par Driessen et al. et JACO et MICO, développés par la compagnie québecoise Kinova inc., sont des robots d'assistance fixés sur un fauteuil motorisé et correspondent à la technologie actuellement sur le marché pour les patients. Ce sont des robots à 6 DDL pour contrôler la position et l'orientation de l'effecteur ainsi qu'un septième DDL pour contrôler l'ouverture et la fermeture d'une pince qui permet de manipuler l'environnement. Ils se distinguent entre eux par leur architecture, le MANUS possédant notamment un poignet sphérique, contrairement au JACO. Le MICO est une variante du modèle de JACO aux dimensions réduites. MANUS et JACO sont illustrés sur la Figure 2.3.

Ces robots ne possèdent pas de limitations spécifiques, à l'exception de quelques légères lacunes mécaniques pour le MANUS qui perd beaucoup d'énergie en friction et qui se contrôle plus difficilement à cause de problèmes de contrecoup (*backlash*) [20]. Cependant, ils ont tout de même les problèmes de complexité du contrôle mentionnés précédemment, mis en évidence dans [23].

2.1.2 Robots anthropomorphiques

Dans les dernières années, de nombreux chercheurs en robotique se sont tournés vers des designs dits bio-inspirés [9]. Les robots bio-inspirés sont des mécanismes qui vont imiter une structure trouvée dans la nature (humain, animal, etc.), spécialisée pour l'accomplissement

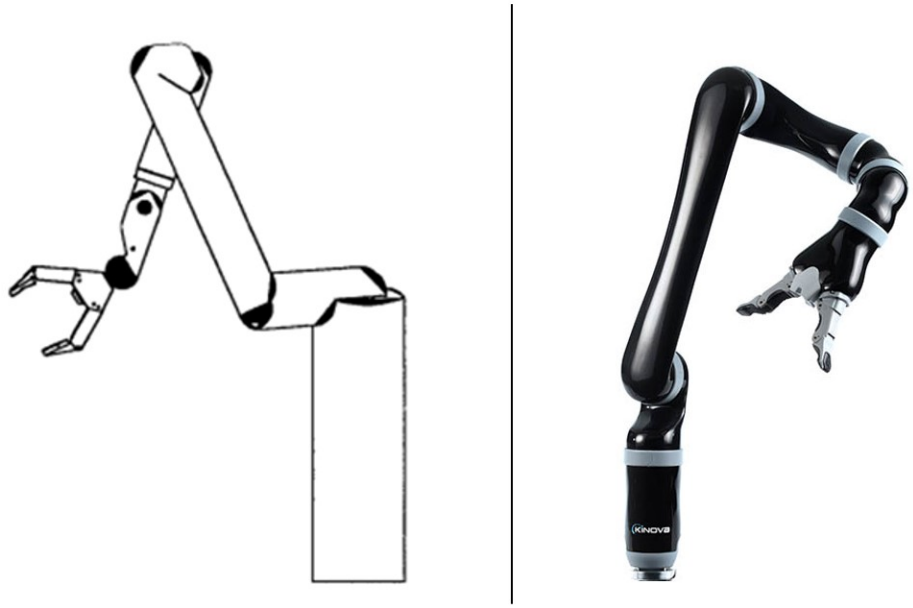

Figure 2.3 Robots d'assistance MANUS et JACO (Images tirées de [5] et [6])

de tâches particulières grâce à des milliers d'années d'évolution. Les systèmes naturels sont non-seulement très performants, mais en plus sont généralement plus efficaces d'un point de vue énergétique [9], il est donc naturel de vouloir profiter de ces avantages dans le design de mécanismes robotiques.

Les robots anthropomorphiques sont une forme de robots bio-inspirés qui ont été étudiés (par exemple [26]–[28]) avec beaucoup de détails parce que leurs capacités et leur allure imitent par définition celles du corps humain [10]. Il s'ensuit donc qu'ils sont très utiles dans des applications où la reproduction du mouvement humain [11] est nécessaire. Puisque l'avenir devrait faire en sorte que les robots nous accompagneront de façon grandissante dans nos travaux quotidiens [29], il conviendra qu'ils soient faciles d'interaction, ce qui correspond à une tâche toute désignée pour les robots anthropomorphiques [11] qui peuvent produire des mouvements à l'allure humaine et par conséquent intuitifs à prédire. On commence d'ailleurs déjà à voir des robots humanoïdes occuper une place grandissante dans les manufactures pour profiter de cet avantage [13]. Les robots humanoïdes ont également une utilité comme robots sociaux [14], permettant la communication et l'interaction avec des personnes requérant des soins psychologiques particuliers.

Différents travaux de recherche ont cherché à reproduire la plupart des membres du corps

humain, notamment à cause du désir répandu dans la communauté scientifique de créer un humanoïde robotique, particulièrement depuis 2012 avec l'avènement du *DARPA Robotics Challenge* (DRC) [30] qui consiste en un défi de construire un humanoïde pouvant opérer dans un milieu dangereux et non-contrôlé et accomplir certaines tâches comme marcher, conduire et percer des murs. Il est intéressant de noter que, pour cette raison, la littérature dans le domaine a récemment commencé à considérer l'anthropomorphisme chez les robots comme une fin en soi et ne s'encombrent souvent plus du besoin d'application à un mécanisme. Certains mécanismes ont tout de même des applications notables, comme les bras et les jambes robotiques pouvant servir de base pour la production de prothèses [28]. Les travaux les plus élaborés dans le domaine traitent des membres les plus articulés du corps comme l'épaule [29], [31], la hanche [26], la main [28], les jambes [32] et bien sûr les bras.

Étant donné leur plus large plage d'applications à l'extérieur du contexte de création d'un humanoïde robotique, les recherches sur les bras robotiques anthropomorphiques font exception à la tendance à ne pas s'accaparer d'une application pour justifier leur design. Au contraire, un grand nombre sont conçus pour des applications très particulières qui peuvent les rendre difficile à transférer hors contexte. Il ont tout de même certains points communs, à savoir qu'ils ont généralement 6 à 8 DDL et qu'ils ont une architecture de la forme épaule sphérique-coude-poignet sphérique. Ci-après sont présentés plusieurs exemples de robots anthropomorphiques. On pourra noter que, bien qu'ils se disent anthropomorphiques, aucun de ces robots n'imite dans les fait la biomécanique du corps humain.

Bras faisant partie d'humanoïdes robotiques

De nombreux humanoïdes robotiques ont été créés avec des bras anthropomorphiques : la série HRP [18], [33], [34], la série ARMAR [35], [36], la série H [17] et ATLAS [37], pour n'en nommer que quelques uns. Les bras de ces robots ont entre 6 et 8 DDL et, outre ce point, leur design se distingue simplement par leur intégration à leurs humanoïdes respectifs. Les humanoïdes en général, et par conséquent leur bras, doivent être très robustes à cause des conditions dans lesquelles ils doivent opérer, notamment pour le DRC, et sont par conséquent également extrêmement massifs. Certains robots, comme ATLAS, opèrent avec des systèmes hydrauliques, idéaux pour des opérations nécessitant des forces très élevées, mais qui sont absolument inappropriés pour un usage comme robot d'assistance étant donné les problèmes d'entretien, la force démesurée du système et simplement le fait que les systèmes hydrauliques sont généralement très salissants.

Des travaux connexes associés à des humanoïdes robotiques ont néanmoins de la valeur pour l'ensemble de la communauté scientifique travaillant avec des robots anthropomorphiques.

Bagheri et al. [38] présente une stratégie d'optimisation du positionnement des épaules pour l'accomplissement de tâches à un et deux bras. La méthode illustrée permet d'identifier des plages de valeurs d'angles pour l'orientation de l'épaule qui maximisent la capacité de manipulation de l'épaule en fonction des paramètres cinématiques et géométriques du robot Walk-Man [39]. Cette même méthode est applicable sur n'importe quelle structure d'épaule similaire et peut permettre le même genre d'optimisation pour d'autres robots afin de générer des mouvements plus efficaces et naturels. Koenemann et al. [12] proposent une méthode pour l'imitation en temps réel de mouvements humains par des humanoïdes, incluant le maintient en équilibre. L'idée derrière la stratégie est de positionner correctement le bout des membres du robot ainsi que son centre de masse pour correspondre au mouvement à reproduire, puis d'ajuster la position en trouvant une position stable par cinématique inverse. Le temps réel est rendu possible par la simplification du modèle de l'humain à imiter. La preuve de concept de la méthode a été faite avec l'humanoïde Nao, tel qu'illustré sur la Figure 2.4, mais peut très bien être transposée entièrement sur un autre humanoïde ou partiellement sur un bras par exemple. Ces travaux permettront la téléopération facile et intuitive de robots anthropomorphiques.

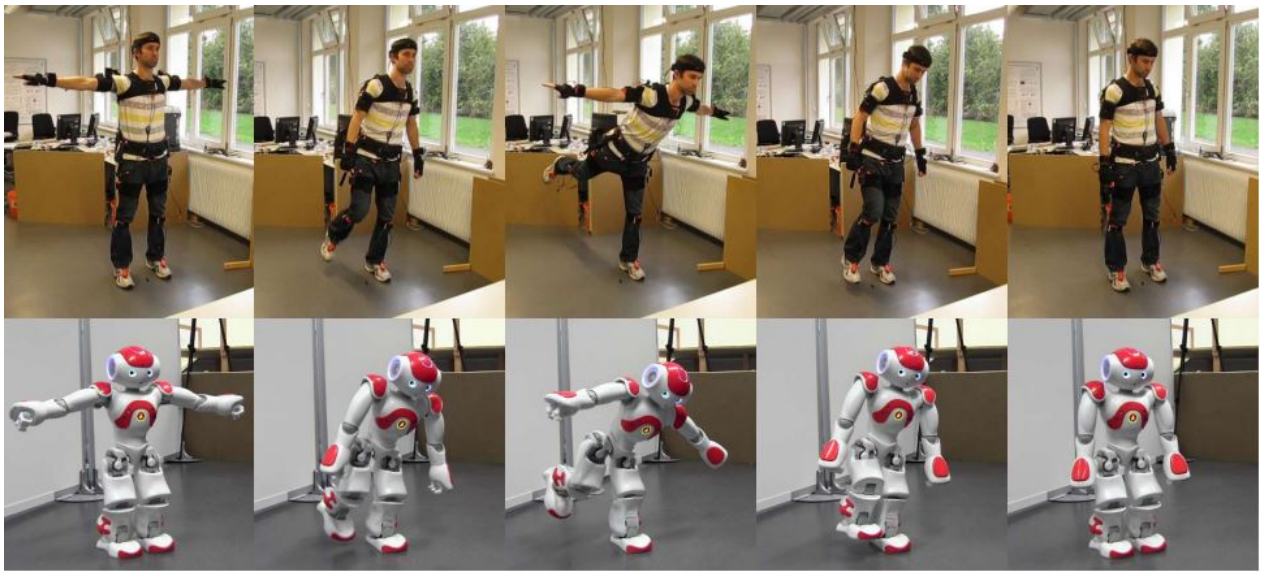

Figure 2.4 Imitation en temps réel de mouvements humains par l'humanoïde Nao (Image tirée de [12])

Manipulateurs robotiques anthropomorphiques

Mustafa et al. ont développé un bras robotique bio-inspiré à 7 DDL actionné par des câbles [16], CDRA (pour *Cable Driven Robotic Arm*). CDRA possède 3 DDL à l'épaule, 1 DDL au

coude et 3 DDL au poignet. Le design de ce robot avait pour objectifs principaux d'être agile et léger pour améliorer la sécurité de certains designs de robots de réadaptation. Le premier objectif a été atteint grâce aux avantages des robots anthropomorphiques, lui offrant ainsi la redondance, la dexterité et l'espace de travail nécessaire. Le second objectif a été atteint par le choix de créer un robot actionné par des câbles. Cela offre l'avantage de pouvoir, simplement en allongeant les câbles, actionner chacun des joints à distance et donc d'installer les moteurs à la base du robot. Ainsi, les actionneurs proximaux n'ont pas à supporter le poids de ceux distaux, ce qui diminue grandement l'inertie du manipulateur. Son design comporte toutefois d'importantes limitations pour une application comme robot d'assistance. Il est fragile et, à cause des câbles, son mécanisme est très complexe et en plus risque de s'emmêler sur lui-même ou dans son environnement si des précautions ne sont pas préalablement prises pour isoler le mécanisme. Le robot est illustré sur la Figure 2.5.

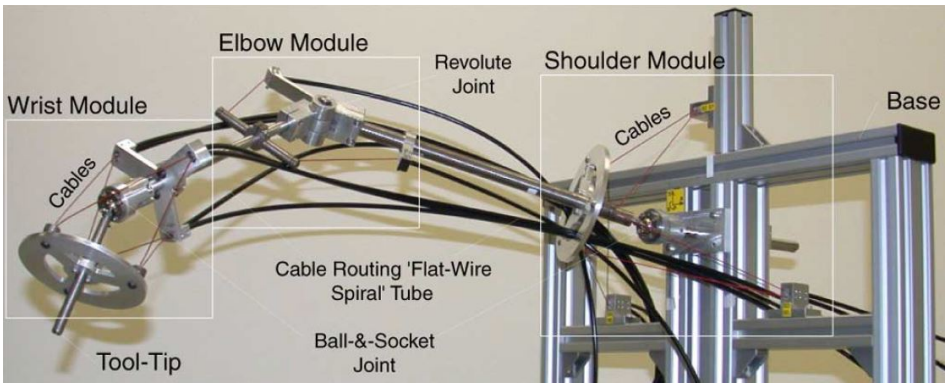

Figure 2.5 Robot CDRA (Photo tirée de [16])

Rader et al. ont développé une architecture de bras robotique à 8 DDL, appelé KIT, pour des usages en manipulation nécessitant deux bras [19]. Leur design a pour but de combiner la robustesse des robots industriels à la flexibilité des robots anthropomorphiques. La particularité de ce robot est l'inclusion d'un quatrième DDL à l'épaule pour imiter l'implication de la clavicule dans le mouvement du bras et faciliter l'interaction entre deux manipulateurs dans un contexte de manipulation à deux bras. Le reste de l'architecture du robot suit la forme classique des robots anthropomorphiques, tel qu'illustré sur la Figure 2.6. Encore une fois, les choix de design associés à l'application choisie pour le développement, à savoir la robustesse industrielle - et donc la masse qui vient avec -, et la manipulation à deux bras, font en sorte qu'une utilisation de ce robot comme robot d'assistance serait difficile.

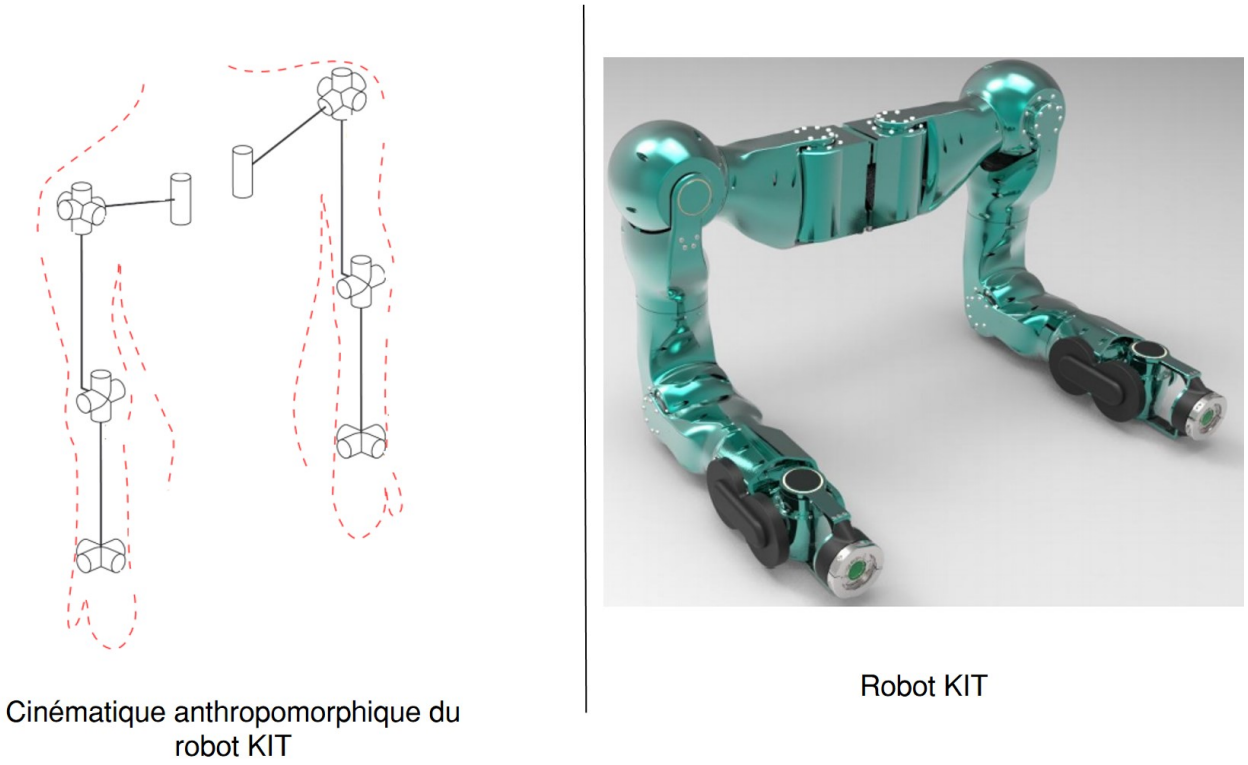

Figure 2.6 Robot KIT (Image adaptée de [19])

Autres

Les travaux de Shapiro [27] mettent en évidence une utilité moins directe aux robots anthropomorphiques en créant un mécanisme plus passif que la grande majorité des robots. En effet, il décrit le développement d'un bras robotique dont l'objectif est d'imiter la résistance aux joints d'un bras humain pour un mannequin utilisé en arts martiaux. Il s'agit là d'un exemple où l'application robotique permet de mieux comprendre le fonctionnement du corps humain, plutôt que d'utiliser le corps humain pour en tirer des enseignements en robotique.

2.1.3 Mécanismes robotiques

Les robots peuvent être séparés en trois catégories de mécanismes : sériels, parallèles et hybrides [21]. Les robots parallèles sont des mécanismes pour lesquels il existe plusieurs chaînes cinématiques entre la base du robot et son effecteur [40], tandis que les robots sériels ne possèdent qu'une chaîne cinématique et que les hybrides possèdent des segments en parallèle mis en série avec d'autres mécanismes.

D'un côté, l'étude des robots sériels en est une essentiellement de géométrie et peut être réalisée systématiquement à l'aide d'une convention proposée par Denavit-Hartenberg [41] qui représente chaque chaîne cinématique par une série de paramètres, deux angles et deux distances. Ces paramètres permettent ensuite de construire des matrices de transformation permettant d'effectuer les changements de repère de la base du robot à n'importe quel repère sur le robot. Une méthode alternative et aussi systématique pour obtenir ce résultat est la théorie des visseurs [42]. L'analyse cinématique des robots sériels peut être simplifiée si son architecture incorpore un poignet sphérique [43], c'est-à-dire que le mécanisme des trois derniers joints n'influence que l'orientation de l'effecteur et pas sa position. Les robots sériels sont généralement utilisés comme manipulateurs avec souvent 6 DDL. Des exemples de robots sériels répandus sont : les robots industriels KUKA [44], les robots industriels FANUC [45] et les robots PUMA [46].

D'un autre côté, l'étude des robots parallèles ne peut pas être faite de façon systématique [47]. Chaque mécanisme doit être analysé séparément, car les équations de cinématique et de dynamique dépendent de l'architecture du robot. En particulier, les équations associées à la cinématique du robot sont soumise à des contraintes de fermeture de boucle [40] pour résoudre la position de joints passifs dans la cinématique en s'assurant que toutes les pièces qui sont sensées être fixées ensemble le demeurent. La complexité des mécanismes parallèles leur confère toutefois des avantages notables : une précision, une vitesse et une force accrues en plus d'une meilleure distribution de l'effort sur les différents actionneurs du mécanisme [47]. Cependant, ce gain se fait au coût d'un espace de travail réduit qui correspond au croisement des espaces de travail des différentes chaînes cinématiques du mécanisme. Certaines études ont tout de même obtenus quelques résultats qui peuvent être généralisés à l'ensemble des robots parallèles ou sériels [48]–[52]. Senoo et al. [48] ont montré qu'avec une combinaison de moteurs et de senseurs haute vitesse, on pouvait générer une nouvelle gamme de trajectoires en profitant des effets d'inerties du mouvement des robots. Merlet et al. [49] présentent et comparent différentes stratégies numériques pour obtenir la cinématique directe de robots parallèles, connue pour être plus difficile à obtenir que la cinématique inverse contrairement aux robots sériels, et identifient le nombre de solutions que chaque méthode peut obtenir. Le choix d'algorithme choisi pour la cinématique directe aura un impact sur la performance du système en temps réel, il importe donc de choisir l'algorithme à la performance adéquate. Zhuang et al. ont produit une méthode permettant la calibration de mécanismes parallèles à partir du résidus de cinématique inverse [50]. La calibration d'un robot consiste à caractériser avec précision les valeurs de ses paramètres géométriques et inertiels et est très importante car la précision de ces paramètres influence la précision du positionnement de l'effecteur des manipulateurs [53]. Khalil et al. [51] ont présenté une méthode pour le partitionnement de la

matrice jacobienne des robots parallèles pour simplifier les calculs de cinématique directe et inverse. Enfin, Sklar et al. [52] ont développé un formalisme de coefficients d'influence pour faciliter l'analyse dynamique des robots hybrides.

Malgré le fait que les mécanismes parallèles doivent être étudiés au cas par cas et généralement conçus sur mesure à cause des restrictions sur leur espace de travail, certaines architecture de robots parallèles ont été analysées dans plus de détails étant donné leur nature générale les désignant pour une large gamme d'applications. Les plus notables permettant différents types de mouvement (cartésien, angulaire et mixte) sont le robot Delta, les manipulateurs parallèles sphériques (MPS) et les hexapodes. Ceux-ci sont illustrés à la Figure 2.7 et sont décrits ci-bas avec leurs caractéristiques pour pouvoir les intégrer au design du bras développé dans le cadre de ce projet si nécessaire.

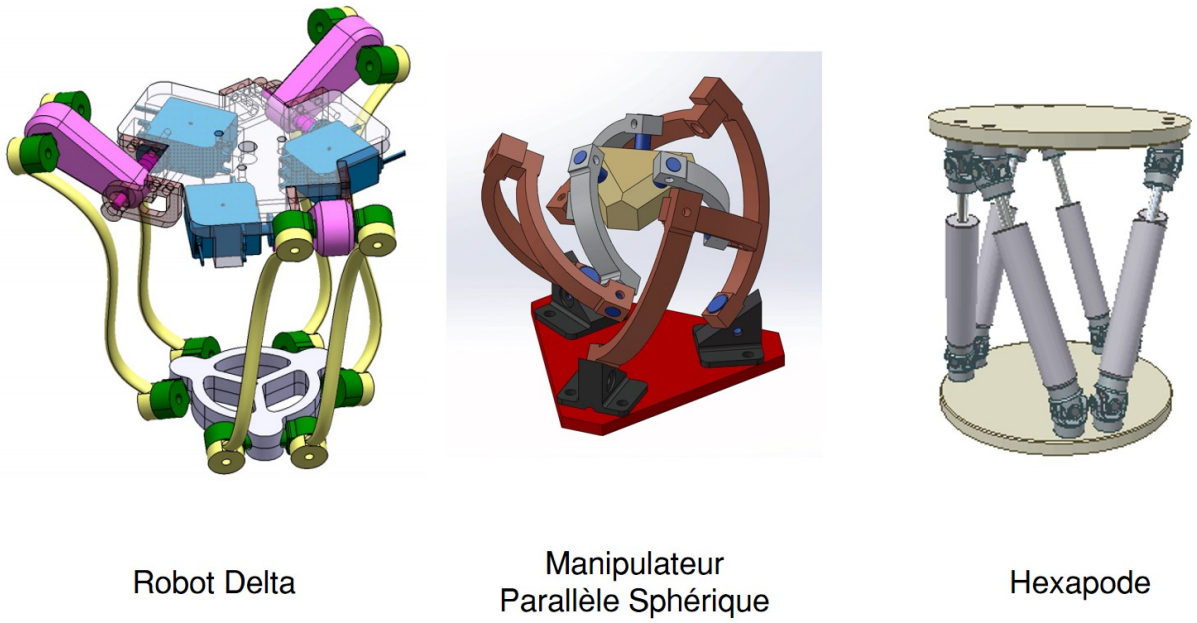

Figure 2.7 Robots parallèles communs

Le robot Delta

Le robot Delta [54] est un robot parallèle à trois DDL en translation. Il s'agit d'un effecteur attaché à une base via trois chaînes cinématiques actionnées à la base qui permettent de déplacer l'effecteur sans en changer l'orientation. Il permet un positionnement rapide et précis dans un espace cartésien. Son espace de travail correspond à trois demi-tors séparés par des angles de 120° [55] dont le volume dépend des dimensions géométriques du robot.

Williams et al. [56] en ont fait l'analyse cinématique pour un design à base de joints rotoïdes, tel qu'illustré sur la Figure 2.7, ou prismatiques. Il peut être optimisé géométriquement pour maximiser sa manipulabilité, définie par Salisbury et Craig [57] comme le produits des normes de la matrice jacobienne d'un système et de son inverse, ainsi que son utilisation de l'espace [58]. Le robot Delta est utilisé particulièrement dans des applications de prendre-et-placer (*pick-and-place*) [59] où sa vitesse et sa précision sont mises à profit.

Les manipulateurs parallèles sphériques

Les MPS sont aux coordonnées angulaires ce que le robot Delta est aux coordonnées cartésiennes, c'est-à-dire qu'il s'agit d'un mécanisme à 3DDL en pure rotation. Il s'agit d'un effecteur attaché à une base via trois chaînes cinématiques actionnées à la base qui permettent de changer l'orientation de l'effecteur sans en changer la position. Quelques travaux de recherche ont porté sur le MPS, i.e. pour des paramètres géométriques arbitraires, dont Bonev et al. qui en ont déduit la forme de l'espace de travail [60] en fonction des paramètres géométriques et Staicu et al. [61] qui ont effectué les calculs de sa dynamique par le Principe des Puissances Potentielles (PPP). Éventuellement, Gosselin a effectué l'optimisation géométrique du MPS [62] pour en maximiser l'espace de travail et la manipulabilité, ce qui a mené au design du robot appelé l'*agile eye* [63]. De cette optimisation a également découlé le fait que l'espace des singularités du mécanisme est minimisé à des courbes, par rapport à des surfaces et que ces singularités se retrouvent principalement sur la bordure de l'espace de travail du mécanisme [64]. Ce design a été analysé dans le détail [65] par Gosselin et al. qui ont dérivé les équations explicites pour la cinématique directe et inverse du robot [66] ainsi que pour résoudre ses équations de fermeture [67], calculé sa dynamique inverse [68] et implémenté le mécanisme dans un système d'orientation de caméra [69]. En plus d'être utilisé pour orienter une caméra, l'*agile eye* a également été utilisé pour créer un poignet agile [70].

Les hexapodes

Enfin, les hexapodes sont des robots parallèles à 6DDL qui permettent d'orienter et positionner une plateforme à l'aide de six joints actionnés et généralement prismatiques. Dans son design le plus symétrique, celui pour lequel les six chaînes cinématiques ont les mêmes dimensions, on l'appelle généralement la plateforme de Stewart ou plateforme de Gough-Stewart, du nom de ses concepteurs [71]. Sa cinématique a été analysée par Li et al. [72] pour déterminer la nature des singularités du mécanisme et sa dynamique a été analysée par Liu et al. [73]. Les hexapodes ont sucité un intérêt dans des applications variées comme l'orientation d'antennes ou les simulateurs de vols [59], si bien que des travaux de recherche

ont toujours lieu au sujet de ce mécanisme vieux de soixante ans, que ce soit au niveau du contrôle [74], de l'analyse de vibrations [75] ou de la rétroaction [76] pour n'en donner que quelques exemples.

2.1.4 Robots redondants

On notera que des notions sur les robots redondants sont nécessaires car le manipulateur présenté au Chapitre 4 est un robot redondant.

On appelle robots redondants les robots qui possèdent plus de DDL que de dimensions de travail [21]. Par exemple, dans un espace 3D, il existe six dimensions de travail, trois positions et trois orientations, donc tous les robots avec sept DDL ou plus sont considérés redondants. Cette redondance amène une flexibilité mathématique au niveau de la résolution des équations de cinématique inverse, puisque le système devient alors sous-contraint, c'est-à-dire que ses six contraintes (orientations et positions) peuvent être résolues avec sept variables, ce qui mène à un nombre plus grand, pouvant même aller jusqu'à l'infini de solutions pour la cinématique inverse [77]. Pour un robot redondant à $n+6$ DDL, ces n variables supplémentaires peuvent alors permettre de résoudre la cinématique inverse avec jusqu'à n contraintes supplémentaires, par exemple pour faire de l'évitement d'obstacles [78]. Les variables toujours en surplus du nombre de contraintes imposées au système peuvent également permettre l'optimisation de critères qui peuvent alors être définis spécifiquement pour les applications considérées, comme la minimisation de l'énergie dépensée [79], le couple appliqué [80], la distance aux singularité [81], ou plusieurs autres [82]. Des combinaisons de ces critères peuvent même être optimisés grâce à la redondance [83].

Pour résoudre la redondance et effectuer la cinématique inverse, il faut donc résoudre un problème d'optimisation dans le cas où l'on souhaite minimiser un critère, ou un système d'équations. Cela peut être exprimé mathématiquement comme dans l'équation 2.1.

$$\begin{aligned} &\textbf{min} && f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \\ \textit{Sous Contraintes}: \quad &&& \mathbf{x}(\mathbf{q}) = \mathbf{x_d} \\ &&& \mathbf{h}(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \end{aligned} \tag{2.1}$$

où :

— $f()$ est une fonction à minimiser, construite sur mesure en fonction du problème. Elle peut valoir 0 dans le cas où on ne souhaite que respecter des contraintes et non minimiser un (ou plusieurs) critère(s).Elle doit dépendre de $\mathbf{q}$ et/ou de ses dérivées temporelles.

— $\mathbf{q}$ est une matrice colonne contenant les positions des différents joints.
— $\dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ sont les dérivées temporelles première et seconde de $\mathbf{q}$. Les dérivées temporelles subséquentes pourraient également être utilisées.
— $\mathbf{x}()$ contient la position et l'orientation de l'effecteur du robot en fonction de la position de ses joints.
— $\mathbf{x_d}$ est une matrice colonne contenant la position et l'orientation désirées de l'effecteur.
— $\mathbf{h}()$ est une fonction contenant les contraintes supplémentaires à respecter par le robot. Elle peut valoir 0 dans le cas où l'on ne souhaite que minimiser un (ou plusieurs) critère(s) et non respecter des contraintes.

2.2 Anatomie fonctionnelle du membre supérieur

Étant donné que les robots d'assistance décrits précédemment sont des bras, il convient pour effectuer un robot d'assistance anthropomorphique d'étudier la biomécanique du bras humain pour en faire souligner les principales caractéristiques à reproduire afin de créer un produit imitant physiquement correctement le bras humain.

Le bras est composé de trois os principaux, l'humérus, le radius et l'ulna, connectés à trois joints, l'épaule reliant l'humérus au thorax par l'entremise de la clavicule et la scapula, le coude reliant l'humérus à l'avant-bras formé du radius et de l'ulna, et le poignet reliant l'avant-bras à la main, [84]. Comme pour le reste du corps humain, les joints du bras sont actionnés par des muscles [85], cependant leur étude n'est pas nécessaire dans le cadre d'un projet de robotique puisqu'il est possible, et même généralement plus simple, d'avoir accès à des joints rotatifs actionnés. La structure du bras est illustrée sur la Figure 2.8.

La main est un mécanisme très complexe comportant 27 os [86], mais ce niveau de complexité n'est pas nécessaire pour une application en robotique où la main peut être directement substituée à l'outil qu'elle est sensée tenir. Par conséquent, cette section se contentera de présenter les mécanismes de l'épaule, du coude et du poignet.

2.2.1 L'épaule

L'épaule est le plus souvent modélisée comme étant un joint parfaitement sphérique [87], [88], représentant l'articulation gléno-humérale joignant la tête de l'humérus à l'homoplate, tel qu'illustré sur la Figure 2.9.

Des modèles plus élaborés ont été également développés pour décrire les mouvements relatifs des différentes articulations reliant le thorax aux os de l'épaule avec des joints sphériques [90], [91] ou prismatiques [92], [93]. Il a été montré [94] que chacun des mouvements de

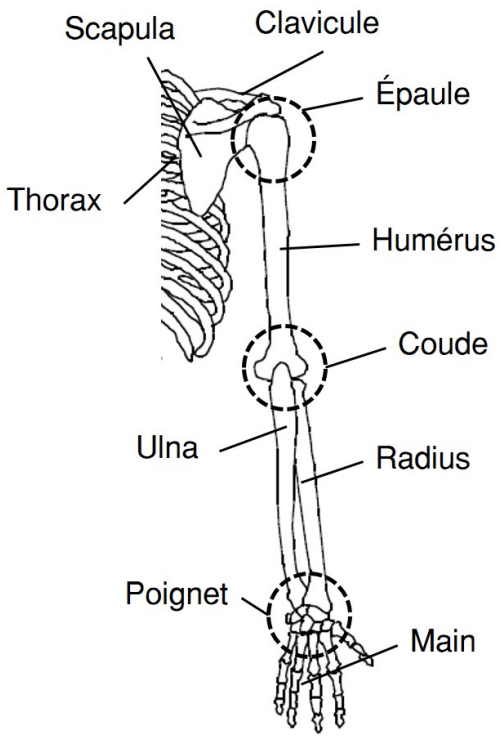

Figure 2.8 Structure osseuse du membre supérieur (Image adaptée de [86])

ces articulations agit de concert pour générer le mouvement approximé par un seul joint sphérique au niveau glénohuméral.

Considérant l'amplitude de chacun de mouvement créée par chacun de ces joints, on considère que l'épaule possède trois DDL [95] en rotation que l'on peut associer à une notation d'angles d'Euler. La convention d'angle la plus appropriée pour décrire l'épaule est la convention de roulis, tangage, lacet puisqu'il existe des correspondances entre les mouvements anatomiques [96] et chacun des angles. Le roulis décrit le mouvement de rotation interne/externe, tandis que le tangage et le lacet décrivent les mouvements de flexion/extension (FE) verticale et horizontale respectivement. Le mouvement de rotation couvre typiquement une plage d'angles allant de $[-90°, 90°]$, le mouvement de FE vertical va typiquement de $[-90°, 120°]$, tandis que le mouvement de FE horizontal couvre une plage angulaire de $[-60°, 120°]$ [97]. La Société Internationale de Biomécanique (ISB) décrit aussi le mouvement d'abduction/adduction de l'épaule distinctement des trois mouvements décrits précédemment puisqu'il est actionné par un groupe de muscles différents [98], mais les DDL impliqués sont simplement une combinaison de ceux responsables des mouvements de flexion/extension horizontale et verticale.

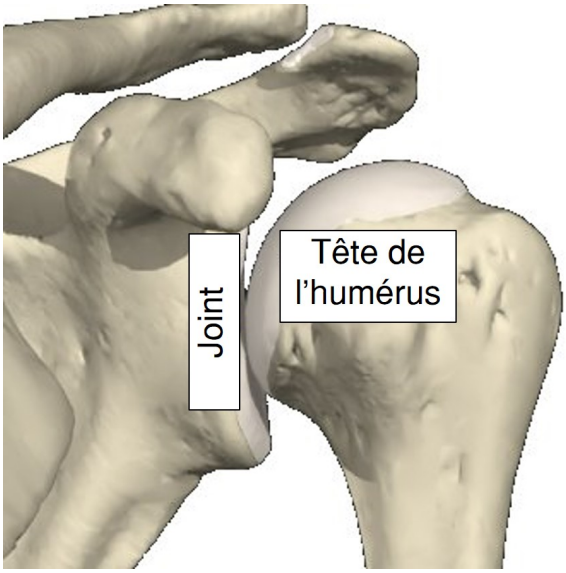

Figure 2.9 Structure du joint gléno-huméral (Image adaptée de [89])

2.2.2 Le coude

Le coude est un joint charnière permettant la rotation de l'avant-bras, composé du radius et de l'ulna, par rapport à l'humérus autour de l'axe de flexion-extension (FE) du coude [99]. La tête de l'humérus, composée de la trochlée humérale et du condyle huméral, est une structure convexe et lisse appuyée sur les têtes du radius et de l'ulna, plus précisément la cupule radiale et la cavité ulnaire, des structures concaves [84]. Les structures convexes et concaves s'emboîtent et permettent le glissement des surfaces pour effectuer une rotation. Ce degré de liberté du coude est modélisé par un joint charnière, mais l'articulation entière est parfois modélisée plutôt comme un joint de cardan [100] ou sphérique [101] pour des raisons qui seront expliquées dans la Section 2.2.3. La structure osseuse et le mécanisme du coude sont illustrés sur la Figure 2.11.

Le mouvement produit par le coude est un mouvement de FE actionné principalement par le biceps et le triceps avec d'autres muscles profonds [95]. Le mouvement décrit l'ouverture et la fermeture du coude, c'est-à-dire l'augmentation ou la diminution de l'angle entre l'humérus et l'avant-bras autour de l'axe de FE, la flexion faisant diminuer l'angle et l'extension l'augmentant, tel qu'illustré sur la Figure 2.12.

2.2.3 Mécanismes d'orientation de la main

Le poignet est la structure osseuse et musculaire reliant la main à l'avant-bras et qui fixe leur orientation relative. En robotique, le poignet des robots est généralement modélisé comme

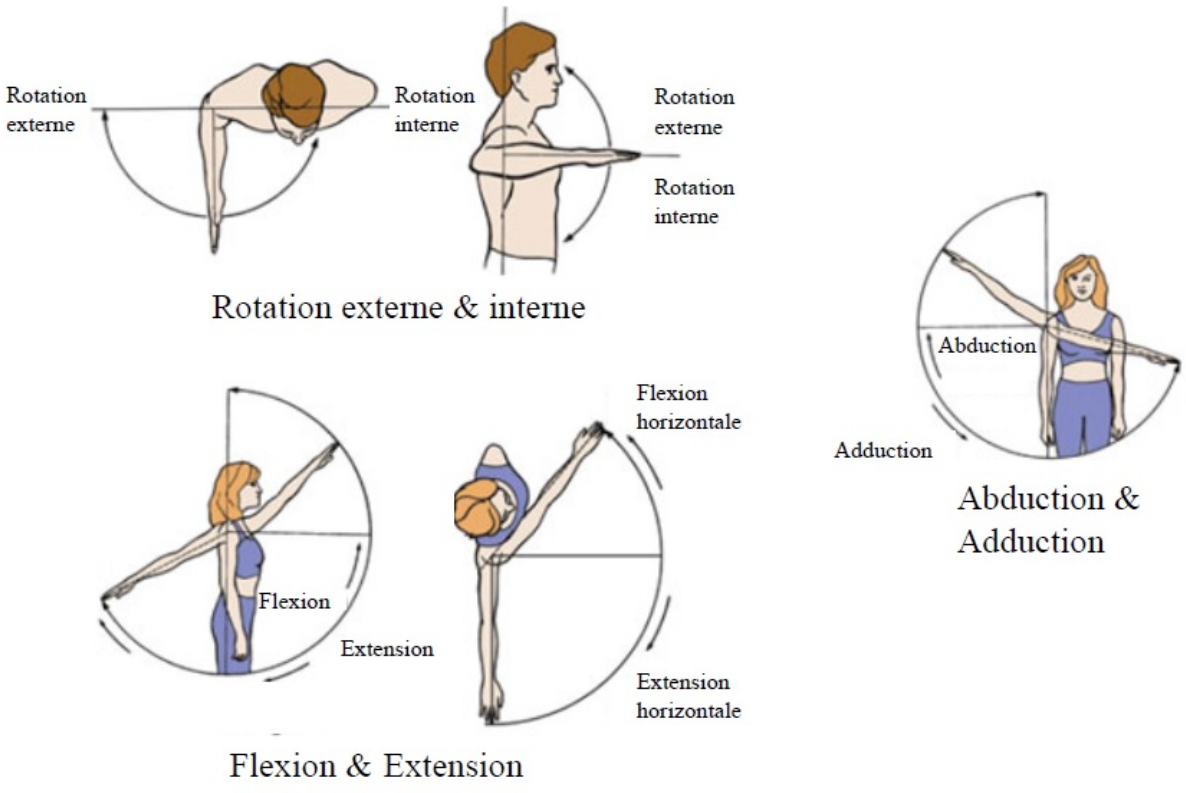

Figure 2.10 Mouvements de l'épaule (Image adaptée de [96])

un joint sphérique à trois DDL pour simplifier les analyses mathématiques reliées à la cinématique [21]. Cependant, en biomécanique, le mécanisme responsable de l'angle de roulis de la main est le plus souvent modélisé au coude [87], [101]–[104], produisant une rotation complète de l'avant-bras sur lui-même plutôt que de la main seulement et ce, complètement indépendamment de la FE du coude. Cette section présente d'abord le mécanisme responsable de la rotation de l'avant-bras, puis les mécanismes de tangage et lacet du poignet tels qu'ils sont habituellement présentés dans la littérature.

Mécanisme de l'avant-bras

D'après les normes de modélisation suggérées par l'ISB [98], l'orientation de la main et de l'avant-bras dépend d'un joint au coude perpendiculaire au joint de FE, faisant ainsi du coude un joint cardan . Cette représentation n'est cependant pas physiologiquement correcte, car un angle appelé *carrying-angle* existe entre l'axe de FE du coude et l'axe de rotation de l'avant-bras [105]. La valeur de cet angle varie entre les individus [106] et pendant le mouvement

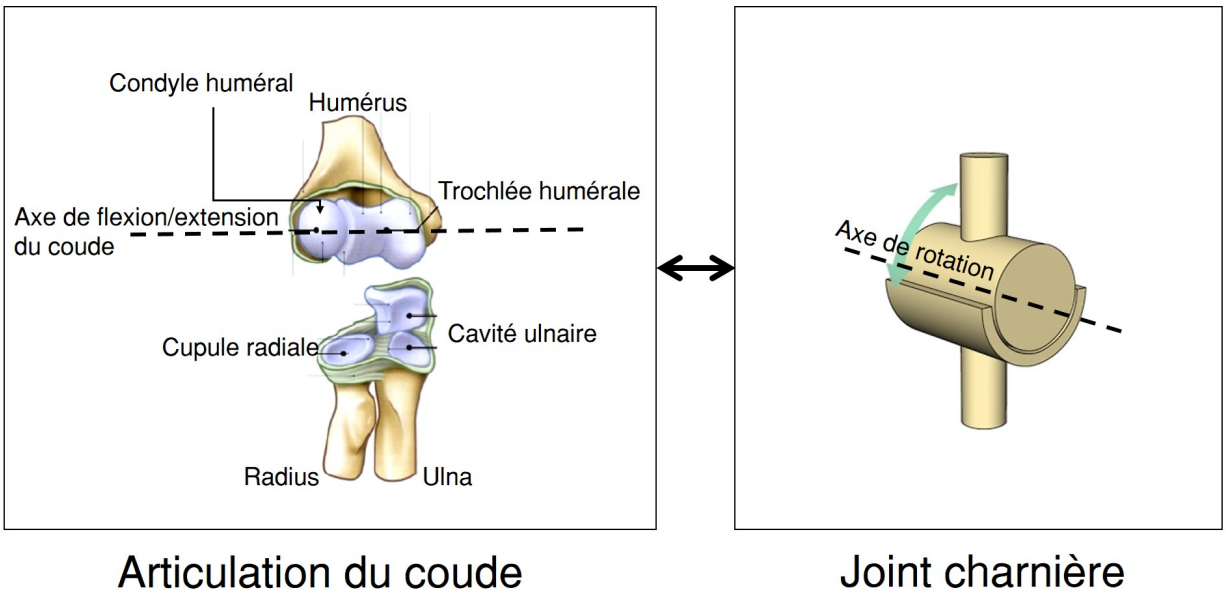

Figure 2.11 Structure osseuse et mécanisme du coude (Image adaptée de [97])

[97], mais vaut typiquement environ 13° [107]. Cet angle est parfois modélisé comme fixe [104], [108], mais certains travaux le considèrent mobile [87], [97], [101], ce qui fait alors correspondre l'articulation du coude à un joint sphérique.

Le modèle biomécanique du membre supérieur proposé par l'ISB possède une autre limitation significative en plus de l'absence du *carrying-angle*. En effet, celui-ci considère également les deux os de l'avant-bras comme une unique structure rigide [109] alors que la présence des deux os implique une boucle cinématique. Les premiers modèles considérant cette boucle cinématique ont assumé que le mouvement de rotation de l'avant-bras et de la main se faisait en maintenant constante la position relative du radius et de l'humérus [110], mais il a été montré que le mouvement résultant de cette hypothèse conduit à une déviation du poignet qui n'est pas naturelle [111]. De plus, des études par imagerie par résonnance magnétique (IRM) [112] ont montré que l'ulna subit une translation et une rotation par rapport à l'humérus pendant le mouvement. À la lumière de ces constatations, Kesckeméthy et Weinberg ([111]) ont développé un modèle de mécanisme représentant la boucle cinématique de l'avant-bras qui incorpore tous les mouvements relatifs du radius et de l'ulna par rapport à l'humérus. Cette boucle cinématique démarre de la connexion au coude et incorpore également un mouvement au poignet permettant la rotation et le croisement des deux os de l'avant-bras pendant le mouvement. Il est illustré sur la Figure 2.13.

Ce modèle a été validé par des études en IRM et il a été déclaré qu'il était le plus complet et

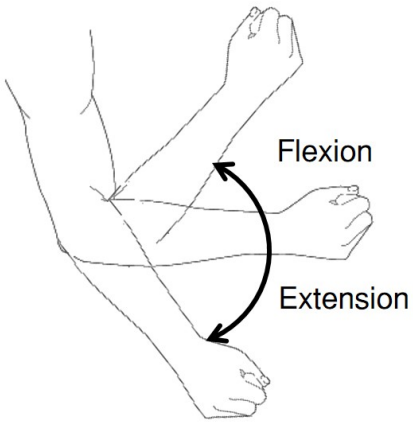

Figure 2.12 Mouvement de flexion/extension du coude

réaliste pour décrire le mouvement du radius et de l'ulna pendant la rotation de l'avant-bras [113].

Le mouvement de rotation de l'avant-bras produit par cette boucle et décrivant du même coup l'orientation de la main selon un angle de roulis est appelé le mouvement de pronation/supination (PS) [114]. À partir d'une position neutre, le pouce vers le haut, le mouvement de pronation correspond à tourner la paume de la main vers le bas tandis que la supination correspond à tourner la paume de la main vers le haut. L'amplitude de ce mouvement par rapport à la position neutre est d'environ 85° en pronation et 90° en supination [115]. Il a été montré que la PS est un mouvement qui joue un rôle important dans la réalisation des tâches quotidiennes et que ça description précise est nécessaire pour le bon rendement fonctionnel du membre supérieur [102], [115], mais la complexité du mécanisme fait en sorte qu'il est négligé et simplifié par les chercheurs [87], [88], [101], [102], [104], [108]. Le mouvement de PS est illustré sur la Figure 2.14.

Poignet

La carpe, c'est-à-dire l'ensemble des os mobiles au poignet joignant l'avant-bras à la main est une structure complexe dont les mouvements sont toutefois considérés négligeables [86]. En considérant la main comme un unique corps rigide, le poignet joint le radius à travers l'articulation radio-carpienne, mais ne joint pas l'ulna. Pour ne pas s'encombrer des complexités physiologiques, les modèles biomécaniques présentent le poignet en fonction des mouvements qu'il permet [105]. Des modèles plus élaborés et précis ont été proposés dans la littérature [116], [117] mais sont toujours en stade de développement.

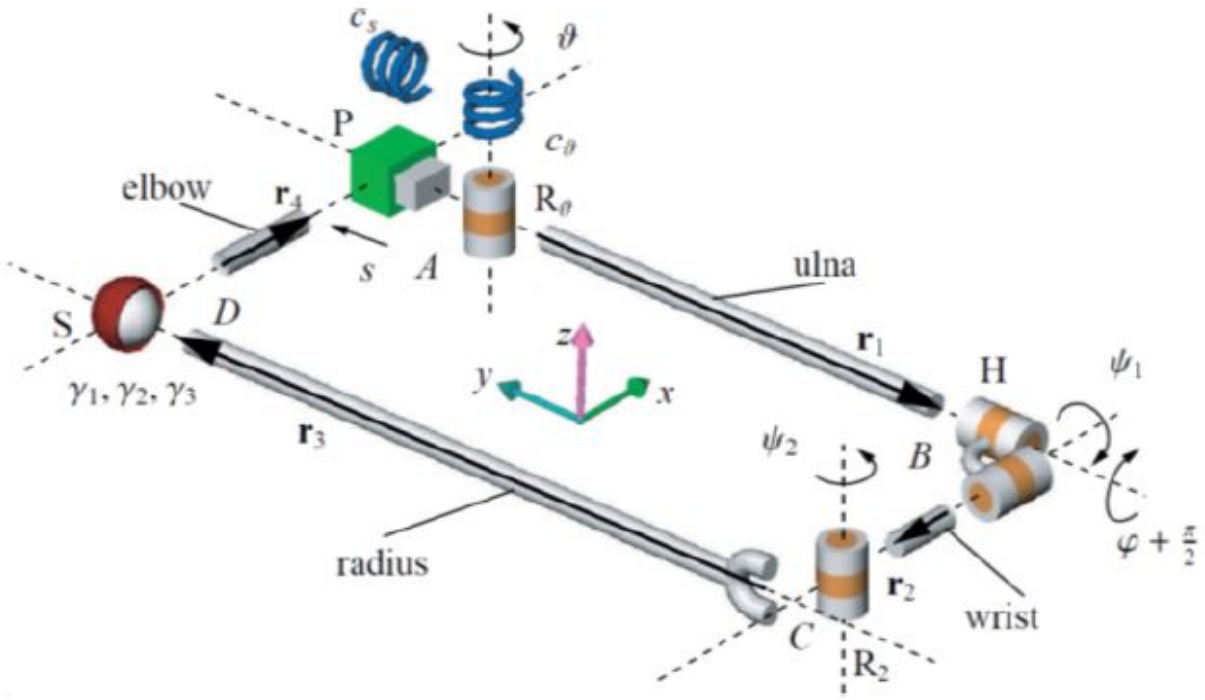

Figure 2.13 Modèle de boucle cinématique de l'avant-bras de Kecskemethy et Weinberg incorporant le *carrying-angle*, la translation de l'ulna et la chaîne cinématique responsable du mouvement de PS (Image tirée de [111])

Les deux mouvements produits par le poignet guident les angles de tangage et de lacet de l'orientation de la main. D'abord, le tangage est associé au mouvement de FE du poignet qui permet de rabattre la main sur le plan formé par la boucle cinématique de l'avant-bras, autour de l'axe formé par les styloïdes du radius et de l'ulna [105] en flexion dans la direction intérieure et en extension dans la direction extérieure. Typiquement, la FE peut avoir une amplitude allant jusqu'à 85° dans un sens comme dans l'autre. Ensuite, l'angle de lacet de la main est guidé par un mouvement d'adduction-abduction, qui est une rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan de la main qui fait dévier le radius et l'ulna. Le mouvement décrit par le poignet est illustré sur la Figure 2.15.

2.2.4 Intégration des modèles [97]

Les modèles biomécaniques des articulations présentés précédemment peuvent être combinés pour produire des modèles du membre supérieur entier afin d'étudier leur interaction lors de mouvements complexes. Pour valider ces modèles, des données expérimentales de capture de

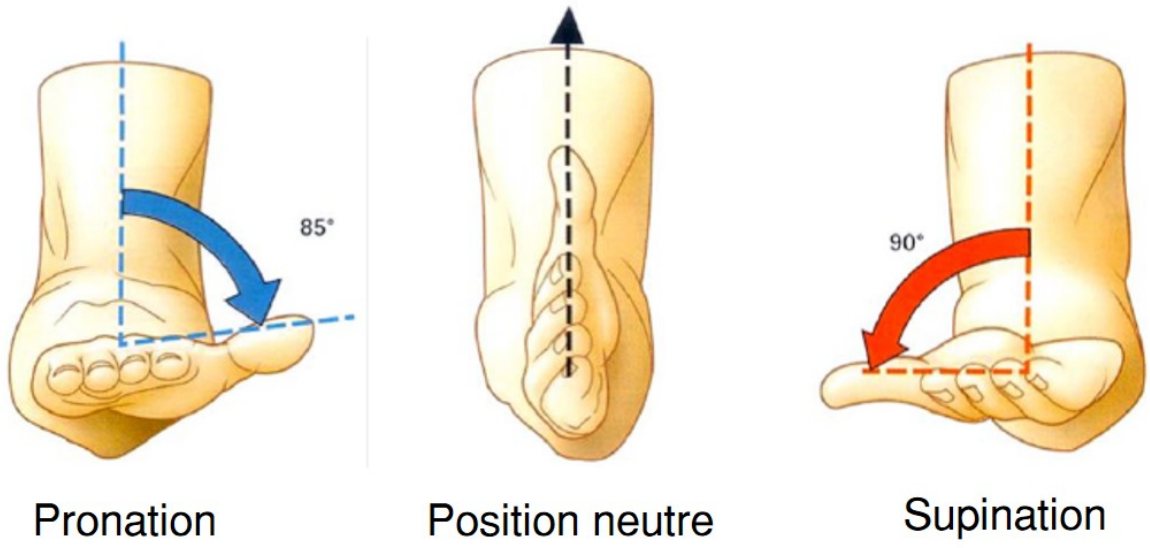

Figure 2.14 Mouvement de pronation/supination (Image adaptée de [114])

mouvements sont acquises sur des sujets effectuant certains mouvements. Les modèles biomécaniques sont ensuite personnalisés pour respecter les paramètres géométriques, comme la longueur des membres de chaque individu, en fonction de mesures anthropomorphiques. Une analyse multi-corps permet par la suite de calculer la dynamique des mouvements mesurés. Cette dynamique peut ensuite être imposée aux modèles biomécaniques afin de tenter de reproduire le mouvement. La qualité d'un modèle est jugée en fonction de l'erreur, calculée comme la norme du vecteur indiquant la différence entre la position d'un point mesuré et la position d'un point correspondant prédite par le modèle.

Laiteberger [97] a comparé différents modèles du mécanisme de l'avant-bras en considérant une épaule dont tous les segments sont séparés par des joints sphériques, un poignet modélisé par des axes de FE et adduction/abduction ainsi qu'une main rigide. Cette étude compare la boucle cinématique de l'avant-bras de Kecskemethy [111] incorporant le *carrying-angle* mentionné précédemment, décrit comme le plus précis de la littérature, à différents modèles dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 2.1 d'après la notation de l'article original.

L'étude de Laitenberger et al. a mis en évidence le fait que le modèle de Kecskemethy est plus précis que tous les autres modèles pour décrire le mouvement de PS avec une erreur de reconstruction en moyenne 20% plus faible, mais décrit même mieux le mouvement de FE du coude avec une erreur en moyenne 10 % plus faible que les autres modèles considérés.

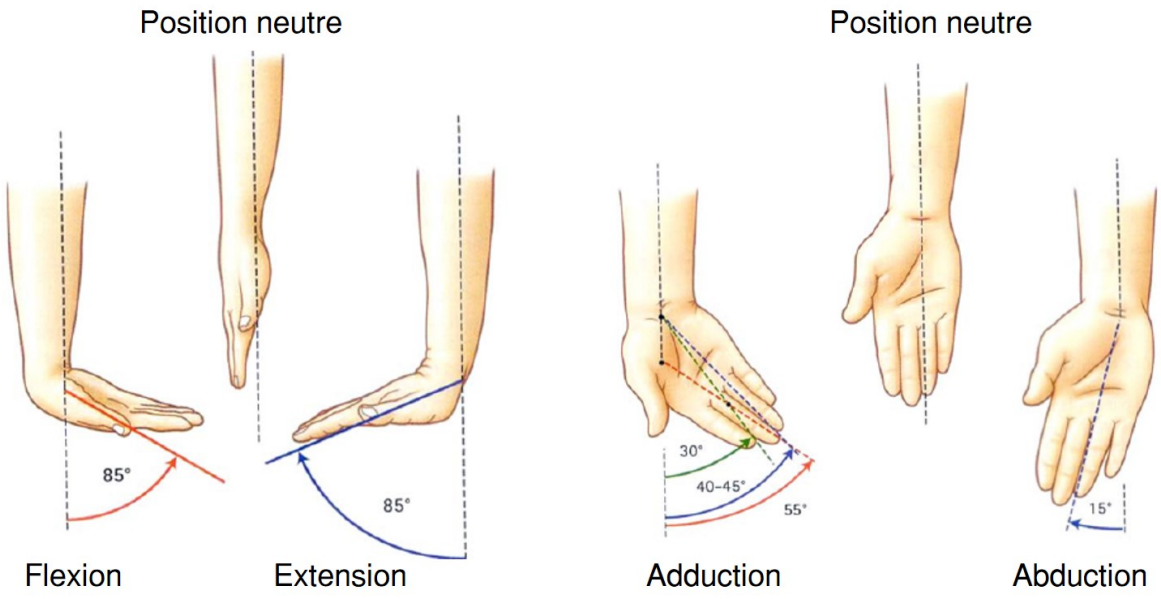

Figure 2.15 Mouvements du poignet

Tableau 2.1 Caractéristiques de modèles biomécaniques du membre supérieur

Identifiant du modèle	Auteur	*Carrying-angle*	Avant-bras
A	Kecskemethy [111]	Actionné	Boucle cinématique
B	Kontaxis [103]	Aucun	Corps rigide
C	Sheean [118]	Fixe	Corps rigide
C2	van Andler [102]	Libre	Corps rigide
D	Pennestri [88]	Aucun	Boucle cinématique

D'ailleurs, l'erreur de reconstruction en PS est jusqu'à 31% plus basse que le modèle de base (B) suggéré par l'ISB [98], ce qui montre qu'une amélioration significative peut être appliquée aux systèmes développés à partir de ce modèle.

2.3 Modélisation multi-corps

Modélisation multi-corps est le terme employé pour décrire l'analyse cinématique et dynamique de mécanismes comportant plusieurs corps rigides joints entre eux. Il s'agit d'une technique de modélisation qui a pour hypothèse que les corps sont indéformables, ce qui est une hypothèse très réaliste dans un contexte de robotique, et sont reliés entre eux dans une structure arborescente pouvant être ouverte ou fermée, tel qu'illustré sur la Figure 2.16

représentant la chaîne cinématique du système à modéliser.

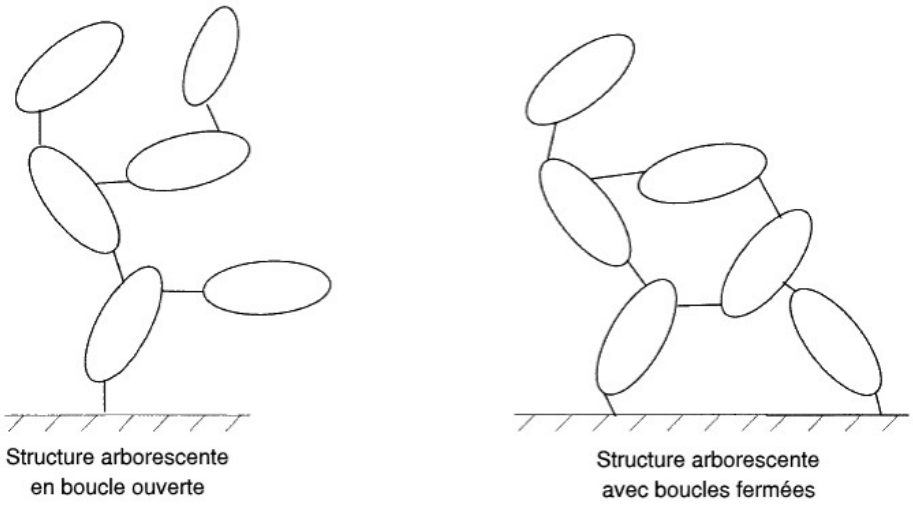

Figure 2.16 Exemples de structures arborescentes considérées en modélisation multi-corps (Image adaptée de [119])

La modélisation est une étape primordiale dans l'analyse d'un mécanisme robotique puisqu'elle permet de déterminer de quelle façon celui-ci va pouvoir se mouvoir [120]. La modélisation cinématique prend en considération les paramètres géométriques du robot et fournit les outils mathématiques nécessaires au calcul de son espace de travail par exemple [40], tandis que la modélisation dynamique prend aussi en considération les paramètres inertiels afin d'obtenir les équations du mouvement pour le mécanisme en faisant intervenir les lois de la mécanique classique. Cette section présente différents formalismes permettant d'effectuer ces calculs.

2.3.1 Modélisation des boucles cinématiques

La modélisation des boucles cinématiques dans les robots parallèles est plus complexe par rapport aux architectures sérielles, parce qu'elles comportent des joints passifs, c'est-à-dire des joints non-actionnés [119]. Les chaînes cinématiques à boucle ouverte peuvent être analysées simplement avec des matrices de transformation dépendantes des joints actionnés pour effectuer les différents changements de repères entre la base et l'effecteur, mais la nature dépendante des joints passifs dans les systèmes à boucle fermée fait en sorte qu'il n'est pas possible d'utiliser directement la même approche.

En fait, pour faire la modélisation d'un système multi-corps comportant des boucles fermées, il faut artificiellement ouvrir les boucles via des coupures du modèle qui se traduisent mathématiquement en contraintes [119]. Il est possible d'en décrire trois types :

1. La coupure d'un corps qui consiste à ouvrir une boucle et à ajouter à l'extrémité de la chaîne résultante un corps virtuel identique à celui présent au point d'attache. Cela se traduit par six contraintes par coupure imposées sur le système qui consistent à égaliser dans un repère global la position (en 3D) et l'orientation (également en 3D) du corps virtuel avec son original.

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}) = \mathbf{x}(\mathbf{q}) - \mathbf{x_v}(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \tag{2.2}$$

où :
— $\mathbf{x}$ est la matrice colonne représentant la position et l'orientation du corps où a été faite la coupure.
— $\mathbf{x_v}$ est la matrice colonne représentant la position et l'orientation du corps virtuel

2. La coupure d'un joint sphérique qui consiste à ouvrir une boucle en séparant des corps physiquement connectés par un joint sphérique. Cela se traduit par trois contraintes par coupure imposées sur le système qui consistent à égaliser dans un repère global la position du joint sphérique sur les deux corps. L'orientation relative des deux corps est libre étant donné la présence du joint sphérique, ce qui libère les trois contraintes d'orientation présentes lors de la coupure d'un corps.

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}) = \mathbf{p_1}(\mathbf{q}) - \mathbf{p_2}(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \tag{2.3}$$

où :
— $\boldsymbol{p}_1$ est la matrice colonne représentant la position du joint sphérique dans la première chaîne cinématique.
— $\boldsymbol{p}_2$ est la matrice colonne représentant la position du joint sphérique dans la seconde chaîne cinématique.

3. La coupure d'une tige de connexion qui consiste à ouvrir une boucle en coupant un corps dont l'inertie est négligeable connecté aux deux bouts par des joints sphériques. Cela se traduit par une contrainte qui impose une distance fixe (et non-nulle) entre les deux joints sphériques.

$$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{v}(\boldsymbol{q}) \cdot \boldsymbol{v}(\boldsymbol{q}) - l^2 = 0 \tag{2.4}$$

où :
— $\boldsymbol{v}$ est le vecteur décrivant la position relative des extrémités de la tige (deux joints sphériques).

— l est la distance imposée entre les deux joints sphériques. Elle peut être illustrée comme la longueur de la tige.

Ces coupures sont illustrées sur la Figure 2.17.

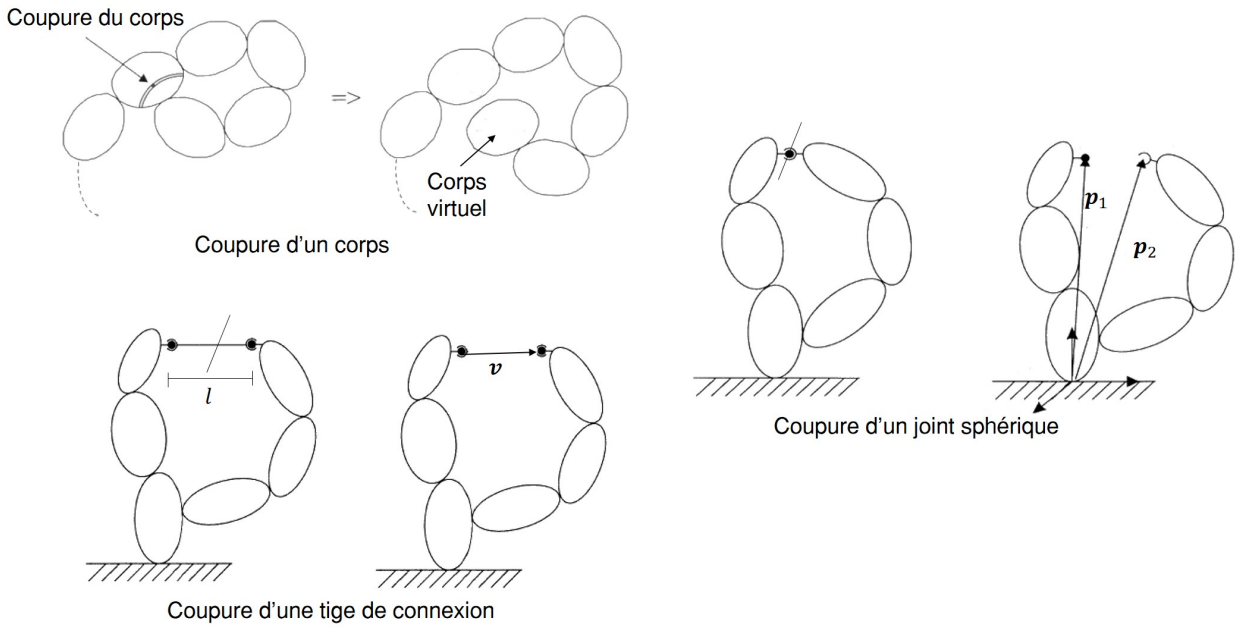

Figure 2.17 Méthodes d'ouverture des boucles cinématiques et illustration des variables des équations 2.3-2.4 (Image adaptée de [119])

2.3.2 Modélisation dynamique

Le but de la modélisation dynamique est d'obtenir les équations du mouvement d'un système, qui sont par la suite utiles dans l'exécution de simulations et pour faire le dimensionnement des actionneurs. L'objectif est d'obtenir un système d'équations différentielles de la forme :

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q},t)\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}},t) &= \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T(\mathbf{q},t)\boldsymbol{\lambda} \\ \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \tag{2.5}$$

où :

— $\mathbf{M}$ est une matrice d'inertie généralisée.

— $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ est la matrice colonne des coordonnées généralisées et ses dérivées temporelles première et seconde.

— t est le temps.

— $\mathbf{c}$ est un terme comportant les interactions dynamiques non-linéaires
— $\boldsymbol{\tau}$ est une matrice colonne contenant les forces généralisées appliquées aux joints
— $\mathbf{J}$ est la matrice jacobienne des contraintes tel que :

$$\mathbf{J} = \frac{\delta \mathbf{h}}{\delta \mathbf{q}} \tag{2.6}$$

— $\boldsymbol{\lambda}$ est une matrice colonne contenant des multiplicateurs de Lagrange.
— $\boldsymbol{h}$ est la matrice colonne contenant les contraintes imposées sur le système.

Ce système peut être transformé en un système d'équations différentielles ne dépendant que des variables indépendantes et traité numériquement grâce à l'application du partitionnement de coordonnées (*coordinate partitioning*). Cette démarche est expliquée dans le détail dans [119], mais correspond, en très bref et simplifié, à choisir des coordonnées qui permettent de séparer le problèmes en deux groupes d'équations, un contenant les variables indépendantes et l'autre contenant les variables dépendantes.

Pour obtenir les valeurs des différents termes de l'équation 2.5, il faut faire intervenir les lois de la mécanique classique. Plusieurs formalismes ont été développés pour obtenir les équations du mouvement. Le choix du formalisme pour attaquer un problème peut être influencé par la complexité du système, l'accès à une cinématique analytique ou le nombre de corps à considérer, mais demeure ultimement une question de préférence personnelle puisqu'ils sont équivalents. En voici quelques exemples.

Newton-Euler

Le formalisme de Newton-Euler se base, comme son nom l'indique, sur les lois de Newton qui décrivent la dynamique translationelle et d'Euler qui décrivent la dynamique en rotation. Dans un référentiel inertiel pour un corps, celles-ci s'expriment respectivement sous la forme [120] :

$$\sum \boldsymbol{F} = m\ddot{\boldsymbol{x}} \tag{2.7}$$

$$\sum \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{I}_{cm}\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{I}_{cm}\boldsymbol{\omega} \tag{2.8}$$

où :

— $\boldsymbol{F}$ est un vecteur de force appliquée sur le corps.
— m est la masse du corps.
— $\ddot{\boldsymbol{x}}$ est l'accélération du corps.

— $\boldsymbol{\tau}$ est un vecteur de couple appliqué sur le corps.
— $\boldsymbol{I}_{cm}$ est la matrice d'inertie du corps exprimé en son centre de masse.
— $\boldsymbol{\alpha}$ est l'accélération angulaire du corps par rapport à son centre de masse.
— $\boldsymbol{\omega}$ est la vitesse angulaire du corps par rapport à son centre de masse.

Le concept derrière le formalisme de Newton-Euler consiste à prendre tous les corps d'un système, y faire l'inventaire des forces et des couples appliqués, incluant les forces de réaction, puis les insérer dans les équations 2.7-2.8 pour obtenir les équations différentielles du mouvement. On peut construire ce système d'équations de façon systématique à l'aide d'un algorithme récursif [121].

Euler-Lagrange

Le formalisme d'Euler-Lagrange se base sur le calcul variationnel et fonctionne grâce au principe de moindre action [120]. Il consiste à construire un élément mathématique qu'on appelle le lagrangien, qui a la forme :

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = K(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) - U(\boldsymbol{q}) \tag{2.9}$$

où :

— $\mathcal{L}$ est le lagrangien.
— K est l'énergie cinétique du système.
— U est l'énergie potentielle du système.

Par calcul variationnel, on peut montrer que le lagrangien doit respecter l'équation suivante pour toutes les coordonnées généralisées q_i :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{d\mathcal{L}}{d\dot{q}_i}\right) - \frac{d\mathcal{L}}{dq_i} = \tau \tag{2.10}$$

où τ est une force généralisée.

En développant l'équation 2.10 pour chaque coordonnée généralisée, on obtient un système d'équations différentielles. Ce système n'est pas de taille minimale si une ou plusieurs coordonnées généralisées peut être exprimée comme fonction des autres. Dans ce cas, l'équation de Lagrange pour cette coordonnée peut être remplacée par une contrainte permettant d'exprimer cette dépendance.

Principe de puissances potentielles

Le principe de puissances potentielles (PPP) stipule que la puissance développée par les effets d'inertie sur un corps à l'équilibre est égale à la puissance développée par les forces intérieures et extérieures agissant sur le système [122]. En prenant en considération des puissances développées par des vitesses infinitésimales, cela peut se traduire par l'équation 2.11.

$$\sum^{i} (m_i \ddot{\mathbf{x}}_i \cdot \boldsymbol{\Delta}\dot{\mathbf{x}}_i + (\mathbf{I}_i \dot{\omega}_i + \tilde{\omega}_i \mathbf{I}_i \omega_\mathbf{i}) \cdot \boldsymbol{\Delta}\omega_i) = \sum^{i} \left(\vec{F}_i \cdot \boldsymbol{\Delta}\dot{\mathbf{x}}_i + \vec{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\Delta}\omega_i \right) \tag{2.11}$$

où le symbole Δ indique une vitesse virtuelle et les autres symboles correspondent aux symboles des équations 2.7 et 2.8.

Pour obtenir les équations du mouvement, il faut substituer dans l'équation 2.11 chacune des vitesses virtuelles des corps par des expressions des vitesses virtuelles des coordonnées généralisées, ce qui nécessite l'accès à une forme de cinématique analytique pour obtenir un résultat exact. Une fois la substitution effectuée et que les équations sont réduites, il apparaîtra qu'elles sont indépendantes des vitesses virtuelles et les équations du mouvement seront obtenues. Le PPP est un formalisme équivalent au principe du travail virtuel, qui stipule que l'énergie produite par un déplacement virtuelle est égale au travail accompli par les forces intérieures et extérieurs agissant sur le système [120], faisant intervenir donc des déplacements virtuels plutôt que des puissances.

CHAPITRE 3 RATIONNELLE DU PROJET

3.1 Résumé de la problématique

Les patients souffrant de paralysie cérébrale, de dystrophie musculaire ou d'autres troubles musculo-squelettiques ont des limitations fonctionnelles importantes nuisant à leur intégration sociale étant donnée leur autonomie réduite. Des outils de robotique d'assistance ont été développés afin d'aider au regain de certaines de ces fonctions quotidiennes et réduire la nécessité d'être accompagné d'un aidant naturel. L'interaction avec ce type de robot peut cependant être difficile parce qu'ils se meuvent d'une façon peu intuitive pour des utilisateurs sans connaissances en robotique. D'un autre côté, les travaux en robotique anthropomorphique sont très nombreux ces dernières années étant donné les avantages que les robots dont l'architecture est inspirée du corps humain offrent au niveau de la facilité d'interaction avec le mécanisme. Les outils de robotique biofidèle seraient donc tout désignés pour une application en robotique d'assistance. Cependant, la revue des connaissances a relevé plusieurs problématiques relatives au transfert de la technologie.

— Les robots d'assistance sont complexes à utiliser.
— Il n'existe pas de robot d'assistance à architecture anthropomorphique.
— Les robots anthropomorphiques existants sont conçus et spécialisés pour des applications particulières.
— Les robots anthropomorphiques existants ne peuvent être transférés à un usage en robotique d'assistance ou de réadaptation, pour différentes raisons en fonction du mécanisme comme la taille ou la complexité.
— Les robots anthropomorphiques sont construits en se basant sur un modèle imprécis du bras humain, négligeant notamment la boucle cinématique de l'avant-bras responsable du mouvement de PS qui est très important pour les tâches fonctionnelles.
— L'erreur de reconstruction du mouvement peut être réduite significativement en incorporant des modèles plus élaborés dans le design des mécanismes.

Pour pouvoir développer des outils pour la robotique anthropomorphique d'assistance et de réadaptation, il est donc d'abord nécessaire de créer une plateforme de développement robotique pouvant les supporter. Étant donné les usagers futurs de la technologie, il est impératif de maximiser la correspondance entre le robot conçu et la biomécanique réelle du corps humain afin de reproduire le plus possible le comportement et l'aspect esthétique du modèle biologique et rendre ainsi l'interaction avec l'appareil développé la plus naturelle possible.

3.2 Objectif général

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un projet à long terme de développement d'un robot d'assistance pour les patients souffrant de limitations fonctionnelles associées à l'usage de leurs membres supérieurs et les cliniciens qui les accompagnent.

L'objectif principal du travail présenté dans ce mémoire est de développer la plateforme robotique sur laquelle pourront être développés et installés différents outils informatiques nécessaires pour un robot d'assistance anthropomorphique. Le robot à concevoir devra par conséquent avoir les mêmes capacités fonctionnelles que les robots d'assistances existants, mais avoir une architecture correspondant à la chaîne cinématique d'un modèle biomécanique précis du bras humain. L'hypothèse de base de ce projet est qu'une imitation précise du corps humain au niveau structurel produira une imitation du mouvement humain également précise.

3.3 Objectifs spécifiques et méthodologie générale du projet

Afin d'atteindre l'objectif général du projet, plusieurs sous-objectifs doivent être accomplis.

1. Choisir un modèle biomécanique approprié pour un usage comme robot d'assistance.
2. Concevoir le mécanisme du robot.
   - 2.1. Convertir les caractéristiques clés du modèle biomécanique en mécanismes robotiques.
   - 2.2. Élaborer un plan technique du robot à l'aide d'outils de dessin assisté par ordinateur.
3. Modéliser la cinématique du mécanisme du robot.
   - 3.1. Calculer la cinématique directe.
   - 3.2. Calculer la cinématique inverse.
4. Modéliser la dynamique du mécanisme du robot.
   - 4.1. Calculer la dynamique directe.
   - 4.2. Calculer la dynamique inverse.
5. Dimensionner et sélectionner les actionneurs pour le robot.
   - 5.1. Concevoir une trajectoire.
   - 5.2. Implémenter un algorithme de contrôle pour le suivi de trajectoire.
   - 5.3. Simuler un suivi de trajectoire et enregistrer les valeurs de couples nécessaires aux actionneurs.

6. Construction d'un prototype physique.
   6.1. Fabriquer les pièces du robot.
   6.2. Assembler le robot.
   6.3. Caractériser le robot.

Le Chapitre 4 présente dans le cadre d'un article scientifique comment chacun de ces objectifs spécifiques a été atteint.

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : DESIGN, MODELING AND DEVELOPMENT OF A BIOFIDELIC ROBOTIC MANIPULATOR

Le présent article a été soumis le 6 avril 2017 pour publication dans la revue scientifique *ASME Journal of mechanisms and robotics*. La contribution de l'auteur principal à cet article est estimée à 90%.

Martin Leroux, Sofiane Achiche, Maxime Raison

Abstract

Anthropomorphic robots generate a great public and industrial interest because of their high potential to easily interact with people. Especially, anthropomorphic robots at the arm-foream level would be useful for various applications such as assistance, haptic rehabilitation, and tele-surgery. Today, some anthropomorphic robots already exist for these applications, but there is still no robotic architecture of the upper limb that could be named "biofidelic", i.e. which would accurately mimic the movements between bones, yielding fidelic human-like motion. The objective of this study is to propose the detailed design of the first biofidelic robotic manipulator, i.e. the arm-foream system excluding the gripper. This manipulator is based on the most accurate biomechanical model of the upper-limb reported in the literature. The paper presents first the detailed kinematic and dynamic models enabling to simulate the manipulator, and secondly the physical prototype reproducing ranges of motion of the human upper limb. The main perspective of this biofidelic robotic manipulator is to support the development of solutions for assistance, rehabilitation, and tele-surgery.

4.1 Introduction

These last years, nature-inspired designs for robots have received extensive interest [1]. Anthropomorphic robots in particular have been extensively studied (e.g. [2]–[4]) because these ones can be used in a wide variety of applications for which mimicking human-like motion is useful [5]. For example, these robots could be used for tele-operation by reproducing to some extent the motion of a user as in [6]. Additionally, their structure allows more intuitive motion than regular manipulators because they mimic human motion and therefore ease the interaction with them. As highlighted by Sodeyama et al. : "it will be commonplace in daily life for humanoid robots to assist humans directly" [7].

Especially, the fields of rehabilitation, adaptation, and assistance robotics would greatly bene-

fit from the use of anthropomorphic robotic arms because these arms are by design generally natural looking, both visually and in their movement [8]. This makes them more intuitive to interact with [5] for users with no specific training in robotic command, such as patients and various clinicians. However, to date, the robotic arms announced as "bio-inspired", do not appear as human-like and would not be suitable for close interaction with humans, either for rehabilitation or assistance : for example, [9] proposed a cable-actuated robot that does not appear so much as human-like ; the robot MOVAID [10] is anthropomorphic but still looks very massive and is designed like an industrial serial robot, so without human-like motion ; finally, [6], [11]–[13] propose structures integrated to entire humanoid robots, which are cumbersome and can not be easily fixed on another base than the one they are designed for.

Generally speaking, anthropomorphic robots are defined as such simply because they have an architecture consisting of a spherical shoulder, an elbow and a spherical wrist, or minor variations of that architecture. They are however not yet "biofidelic", i.e. they do not mimic the bone structure and the kinematic chain of the human body. A more biofidelic architecture yields better human motion imitation [14]. This more accurate behavior would be useful not only for rehabilitation and other contexts where people interact with the robot, but also for applications requiring human dexterity, such as demining operations, tele-surgery or chemical manipulation.

Moreover, it is worth noting that we found no reported existing biofidelic robotic architecture incorporating the two-bones structure of the forearm composed of the radius and the ulna, which would result in a more human-like movement of the robot.

The main objective of this work is to design the first biofidelic robotic manipulator representing the arm-forearm system, and to detail the design steps necessary to achieve this one. The keystone of the proposed solution will be to incorporate both the bone structure topology and the kinematic chain of a human arm to best reproduce the topology and kinematics of a human arm. The focus of this study is to create the first mechanism that shares a comparable range of motion with the human arm, but we do not intent to develop algorithms for human motion in this paper, since it is by itself a very sizeable challenge, as reported in [15]. A secondary objective of the project is to build a development robotic platform that should allow one to add-on assistance-related algorithms that will benefit from the human-like behavior of the biofidelic mechanism.

In the following sections, we propose all the necessary design steps for a biofidelic manipulator designed to mimic an accurate biomechanical model of the human upper-limb (section 4.2), from the shoulder to the wrist but excluding the hand/gripper. We then provide a method to

obtain its kinematics and dynamics (sections 4.3-4.4), and use this method to implement a simulation of the manipulator motion following a trajectory with a computed torque control algorithm (sections 4.5-4.6). Finally, we provide guidelines to build a prototype using 3D printing and compare the range of motion of our prototype to that of a human arm to validate our design (section 4.7).

4.2 Mechanical design

The following subsections first describes the design choices and characteristics of the biomechanical model (subsection 4.2.1) used as a baseline for the design of the developed robotic manipulator and then presents the proposed mechanical design (subsection 4.2.2).

4.2.1 Biomechanical model

The choice of the biomechanical model required to identify three parameters : 1. the number of degrees-of-freedom (DoF) of the model, 2. the nature of the actuators, and 3. the accuracy of the motion yielded by the model compared to human trajectories. This section describes the choice of the model and then summarizes its key characteristics.

Concerning the number of DoF, a general consensus in biomechanics is that the human arm, at the shoulder, elbow and wrist levels is considered to have seven DoF [16] : a spherical joint at the shoulder, a cylindric joint at the elbow and a spherical at the wrist. Common manipulator assistants usually have six DoF [17]–[19], while the humanoid arms mentioned earlier ([6], [11]–[13]) have 7-8 DoF, so the biomechanical model to use as a baseline for design should have between six and eight DoF.

Concerning the nature of the actuators, since the most common and easy to use actuators are revolute, rather than prismatic, we chose to design the robot according to a model that does not include muscles, which act as prismatic joints in the human body. For that reason, only osteo-articular models, rather than musculoskeletal models, were considered.

Finally, a recent state-of-the-art of kinematic models for the upper limb [20] indicates that the model proposed by Laitenberger [21] reproduces the most accurately physiological movement, in particular for the pronation-supination (PS) movement which is the most intricate motion of the arm. The model describes the upper-limb from the thorax to the hand with 14 DoF. Since this model respects all our criteria, we chose to use the portion illustrated on Figure 4.1 as the baseline to design the architecture of our robot .

The main characteristics of the model are summarized in Table 4.1.

Tableau 4.1 Characteristics of the biomechanical model to be mimicked by the mechanism

Model component	Joints	Specifications
Shoulder	q_1 (actuated) q_2 (actuated) q_3 (actuated)	Ideal spherical joint controlling the orientation of the shoulder
Elbow	q_4 (actuated)	Revolute joint controlling the flexion-extension (FE) movement of the elbow
PS loop	q_5 (passive)	Passive joint for loop closure
	q_6 (actuated)	Revolute joint controlling carrying angle between the PS axis and the humerus
	q_7 (actuated)	Revolute joint controlling the PS movement
	q_8 (passive)	Passive joint for loop closure
	q_9 (passive)	Passive joint for loop closure
	Passive ball joint	Three loop closure position mathematical constraints
Wrist	q_{10} (actuated)	Revolute joint controlling the FE movement of the wrist
	q_{11} (actuated)	Revolute joint controlling the abduction-adduction movement of the wrist
Bone Structures	n/a	Personnalized according to anthropomorphic measurements analysed using Symmetrical Center of Rotation Estimation (SCoRE) [22] and Symmetrical Axis of Rotation Approach (SARA) [23]

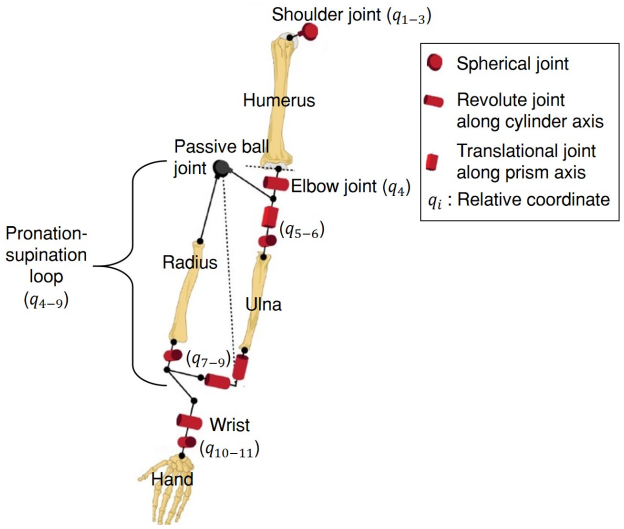

Figure 4.1 Portion of the biomechanical model chosen for the architecture of the robot [21]

4.2.2 Mechanism

In the context of building a robotic manipulator, some adjustments were necessary for the realization of a physical rendering of the model. The design choices for each of the model components are developed in detail in the following subsections.

Those guidelines were used to make a computer-aided design drawing of the complete manipulator using CATIA V5 software (Dassault Systems, USA), illustrated in Figure 4.2.

Shoulder

The physical implementation of the shoulder joint (q_{1-3}) is the most complex since the kinematic model does not consider it to have physical dimensions but it still needs to control three DoF. Ideally spherical actuators are generally driven using magnets, but they are typically not able to generate enough torque [24] ($\sim$ 0.2 Nm). Given the expected inertia of the arm that the shoulder has to move around, it seems imperative to use a mechanical device.

Regarding the implementation on a robot, the physical description of the shoulder joints is an important common limitation to all the previously mentioned mechanical models which consider it as three successive and dimensionless revolute joints, which is non-feasible in real life. Therefore, it is not avoidable for the chosen shoulder mechanism not to mimic exactly the architecture of the human bone structure. Apart from magnetic spherical actuators, using serial mechanisms designs for the shoulder articulation were also not considered as an option because of considerations such as the design complexity required to have a single

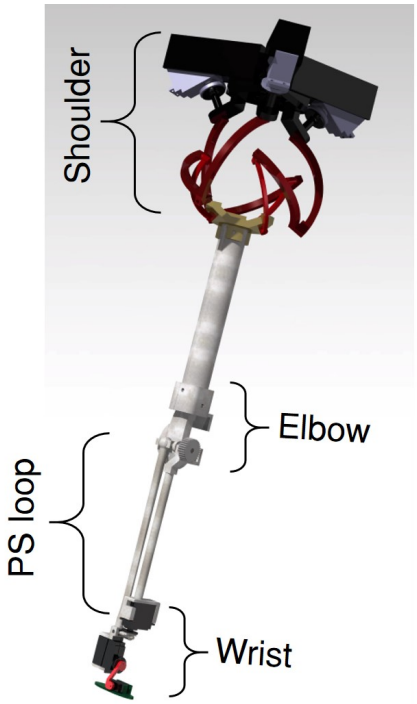

Figure 4.2 Rendered CAD drawing of the robot

center of motion and the uneven effort distribution between the actuators which would risk making the workspace asymmetrical. The only viable remaining alternative is the use of a parallel manipulator design. Parallel manipulators are known to be faster, stronger and more precise, they also have a higher payload-to-weight ratio. However, compared to their serial counterpart, they usually have a smaller workspace and contain many singular configurations in which they can not sustain a wrench. It is worth noting that parallel manipulators were previously used in anthropomorphic designs for shoulders [25], wrist [26] and hips [2].

Spherical parallel manipulators (SPM) were geometrically optimized for various uses, even in anthropomorphic robotics [2], [27]. One of the most prominent ones is a specific design named the agile eye [28]. The agile eye has a large symmetrical workspace and its singularities are mostly, conveniently, located at the edge of the workspace [29]. These properties, make the agile eye ideal as a choice for a shoulder mechanism design. Consequently, the design of the agile eye was used for the physical implementation of the shoulder of the robotic manipulator developed here, thus replacing the joints q_{1-3} of the biomechanical model illustrated in Figure 4.1. The design was adapted to our case by changing the end-effector for a connector to the humerus as is illustrated along with the shoulder mechanism in Figure 4.3.

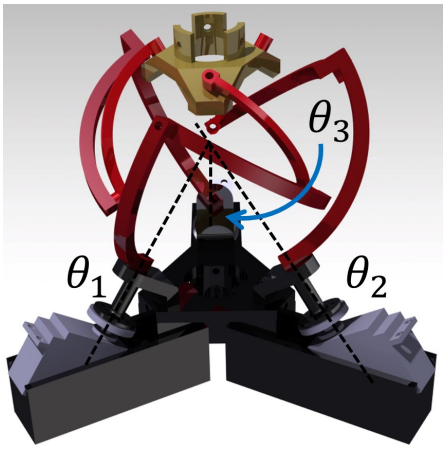

Figure 4.3 Design of the shoulder joint - The agile eye

Elbow

The revolute joint (q_4) controlling the FE motion of the arm was implemented simply by placing a motor at the elbow which rotates the base of the ulna around the FE axis with a set of gears, as illustrated in Figure 4.4, along the proximal side of the PS loop. This revolute joint is fixed to the tip of the humerus which is attached to the end-effector of the shoulder mechanism.

PS loop

The proximal side of the PS loop is fixed to the elbow through two anchor points, as seen in Figure 4.4. The first one is a passive ball joint at the tip of the radius fixed in a corresponding ball socket. The second one in the base of the ulna which is fixed on the FE axis. A passive prismatic joint (q_5) of 2 mm of amplitude is included between the FE axis and the ulna, as dictated by [14].

Adjustments were made regarding the carrying-angle joint (q_6). The complete model described in the previous section has 8 DoF. Since we desire a 7 DoF driven trajectory, we chose to leave the carrying-angle (q_6) joint passive. According to [21], this angle variation has only an amplitude of $\sim 6°$, therefore we considered this movement as a perturbation to be cancelled by a controller. This design choice also has the advantage of avoiding a cluster of actuators at the elbow. A prototype will allow to determine if fixing the joint or another solution is necessary for the ideal behaviour of the movement. The designed mechanism is illustrated in Figure 4.4.

The distal side of the PS loop is composed of a universal joint (q_{7-9}) attached to the distal

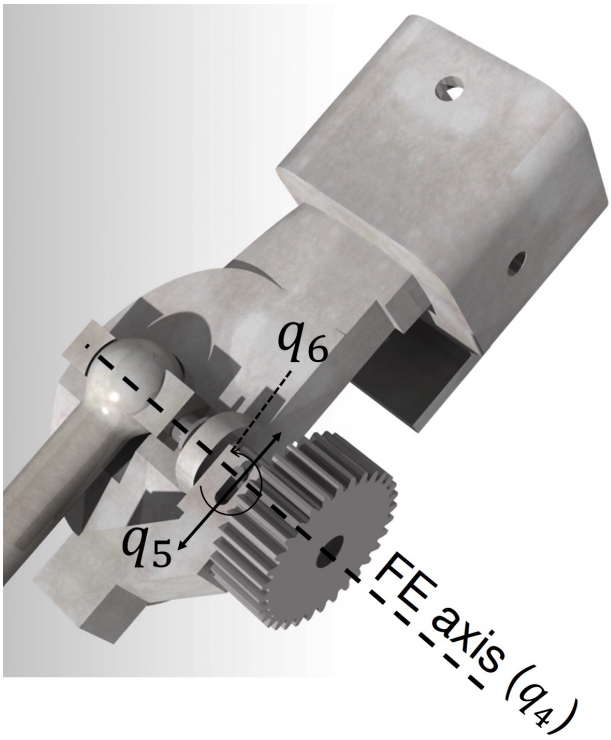

Figure 4.4 Elbow and proximal side of the PS loop mechanism

end of both the ulna and the radius with one DoF actuated along the axis of the ulna, as illustrated in Figure 4.5.

Wrist

The wrist is composed of two motors attached perpendicularly in a series, thus imitating the wrist on the biomechanical model. However, contrary to the model, enough physical space is required to place two actuators. On the proximal end, it is fixed to the distal part of the PS loop, while on the distal end, it is fixed to the end-effector. The mechanism and the joint axis of the wrist are illustrated in Figure 4.5.

Bone structures

To obtain geometrical parameters necessary for the sizing of the bones and the physical structures of the robot, we acquired motion sensor data from a healthy adult subject. Following the instructions given in [21], markers were placed on the subject who was then asked to perform movements of FE, PS, and circumduction to operate the various degrees of freedom

of the arm. This data was filtered using a third order Butterworth filter on MATLAB and the functional and personalized joint parameters were calculated using the Symmetric Center of Rotation Estimation (SCoRE) [22] and Symmetric Axis of Rotation Approach (SARA) [23] methods.

4.3 Kinematics

The vast majority of the kinematics equations, necessary to describe the motion of the robot, was symbolically computed using Robotran software [30], using a recursive Newton-Euler formalism. The shoulder mechanism has to be analysed separately and manually because symbolic analysis software cannot easily deal with overconstrained mechanisms like the agile eye since the additional constraints associated with the loop closure equations are not all independant. Therefore, to compute the kinematics of the whole robot, the shoulder is first considered as an ideal spherical joint, as in Figure 4.1, to compute the kinematics of the arm-forearm complex. Then, the orientation given by the three DoF of the ideal shoulder is used as an input of the agile eye or vice-versa.

The inverse and direct kinematics both for the arm-forearm complex and the mechanism of the shoulder, necessary to compute the equations are given in the following subsections.

4.3.1 Direct Kinematics

Apart from the simulation, the direct kinematics of the arm is also necessary to the computation of the inertia load on the shoulder, as it will be described in section 4.4.1. It will also be used to numerically compute part of the inverse kinematics in section 4.3.2.

The direct kinematic is computed from the base of the shoulder forward to the hand. The orientation of the agile eye mechanism of the shoulder is first computed given the position of its actuators, then the output orientation is used to establish the value of the rotation angles inside the ideal spherical shoulder of the model. The details are given in the following subsections.

Shoulder direct kinematics

The direct kinematics of the shoulder consists simply of applying the direct kinematics of the agile eye. Nonetheless, obtaining the direct kinematics of a spherical parallel manipulator, or as a matter of fact, any parallel mechanism, is usually a tedious task requiring numerical resolutions [31]. However, a closed form solution was found specifically for the agile eye

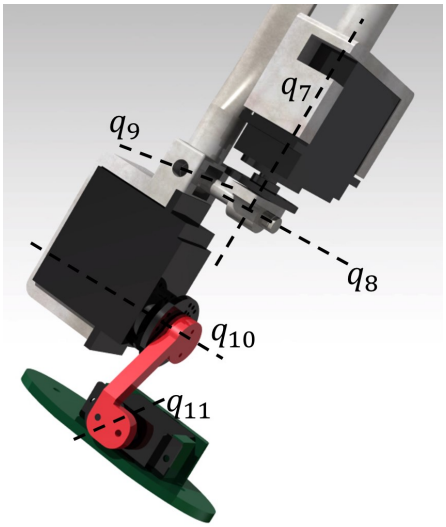

Figure 4.5 Wrist and distal side of the PS loop mechanism

because of its specific geometry [32]. The closed form equations yield 4 possible solutions to the direct kinematic problem of the agile eye.

An optimization criterion is used to identify the correct orientation. To this end, a known initial condition is set for the orientation and each subsequent time step selects the solution closest from the orientation during the previous time step of the simulation. We defined the distance between two orientation matrices as the norm of the difference between vectors containing the Euler angles describing the orientation matrices. It is computed for all 4 possible solutions as indicated in equation 4.1, the smallest result is considered to be the correct solution.

$$\Delta = \left\| Euler(\mathbf{Q}') - Euler(\mathbf{Q}) \right\| \tag{4.1}$$

where :

- Δ is the distance between orientations
- $\mathbf{Q}$ is the rotation matrix from the previous time step.
- $\mathbf{Q}'$ is the rotation matrix from the current time step.
- $Euler(\mathbf{Q})$ computes the Euler angles representing the matrix $\mathbf{Q}$

Direct kinematics of the arm-forearm complex

The direct kinematics of the arm-forearm complex is computed using the symbolic files generated by Robotran. The orientation output by the direct kinematics of the agile eye

is used to compute the angles on joints q_1 to q_3 illustrated in Figure 4.1. First, the position of the dependent angles is computed by solving the loop-closure constraints with a Newton-Raphson algorithm. Then, the transformation matrices between the reference frame of each joint and attaching points are computed. The consecutive application of those transformation matrices allow the computation of the position and orientation of the end-effector, along with the position and orientation of each body of the robot, which will be necessary to compute the inertia applied to the shoulder's effector.

4.3.2 Inverse Kinematics

The inverse kinematics is needed to compute the position required for the joints to place the end-effector at a given position and orientation. Furthermore, special care must be given to the inverse kinematics of redundant (7+ DoF) manipulators since optimization criteria must be selected to obtain a finite set of solutions.

To perform the complete inverse kinematics calculations of the robot, we first compute the joint angles of the simplified model presented in section 4.2.1, with an ideal spherical shoulder, to reach a specific location and orientation of the end-effector. Then, the orientation yielded by the position of the joints (q_{1-3}) at the shoulder is used as an input for the inverse kinematics of the agile eye. Details of each of those two steps go as follows :

Arm-forearm complex inverse kinematics

Given that the arm has 7 DoF, the solution to its inverse kinematics for a completely defined problem (position and orientation) is not unique. Moreover, since the model contains a closed kinematic loop and three dependant passive joint angles, a numerical optimization approach was used to find the desired positions of all the joints given a desired position and orientation of the end-effector.

The minimized value was the total displacement of each actuated joint relatively to its position during the previous time step. This choice of cost function (see eq. 4.2) should make sure that the arm configurations (example : elbow up vs. elbow down) do not erratically switch during a given trajectory of the end-effector, which would practically mean a change in assembly mode.

Three constraints impose the position of the end-effector while three other impose its orientation (x_{ref}), both sets of constrains were obtained using the results of the direct kinematic. Finally, the loop-closure equations ($\boldsymbol{h_{loop}(q)}$) constitute the last three constraints to fix the values of the dependant joints. They can be expressed as the coincidence of the position of

the ball joint attaching the radius to the elbow and its socket. Those equations are large and non-linear and are not expressed here for brevity.

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{q}} \quad & (\boldsymbol{q}-\boldsymbol{q}')^T(\boldsymbol{q}-\boldsymbol{q}') \\ Subject\,to: \quad & \mathbf{x_{ref}} - Direct_Kinematics(\boldsymbol{q}) = 0 \\ & \boldsymbol{h_{loop}}(\boldsymbol{q}) = \mathbf{0} \end{aligned} \tag{4.2}$$

where :

- $\boldsymbol{q}$ is the position of the joints at the current time step.
- $\boldsymbol{q}'$ is the position of the joints at the previous time step.
- $\boldsymbol{x_{ref}}$ is the desired twist array of the robot.
- $Direct_Kinematics()$ is a function computing the direct kinematics.
- $\boldsymbol{h_{loop}}()$ consists in the holonomic constraints computing the loop-closure equations of the robot.

This system was solved using an active-set optimization algorithm from MATLAB.

Shoulder inverse Kinematics

The inverse kinematic of spherical parallel manipulators such as the agile eye was solved a few times in the literature (e.g. [28]). The usual way to express the output of the agile eye kinematics is using a transformation matrix $\mathbf{Q}$ expressing the rotation between the vectors going from the center of rotation of the agile eye to each of the attaching points on the end-effector $\mathbf{v_{1,2,3}}$ and a reference position $\mathbf{v_{0_{1,2,3}}}$, as expressed in eq. 4.3 :

$$\mathbf{v_i} = \mathbf{Q}\mathbf{v_{0_i}} \tag{4.3}$$

From there, some geometry calculation eventually yield three quadratic equations in terms of $\tan(\frac{\theta_i}{2})$ where θ_i is the actuated joint of branch i of the agile eye as seen in Figure 4.3, thus giving a total of 8 solutions to the inverse kinematics.

However, given the special geometry of the agile eye, namely it symmetry and its 90° links, a much simpler closed-form solution to the inverse kinematics was found [32]. It is recalled in equation 4.4 :

$$\tan(\theta_1) = (\tfrac{v_{1z}}{v_{1y}}) \quad \tan(\theta_2) = (\tfrac{v_{2y}}{v_{2x}}) \quad \tan(\theta_3) = (\tfrac{v_{3x}}{v_{3z}}) \tag{4.4}$$

where :

— θ_i is the position of the joint i of the agile eye.
— v_{ij} is the projection of $\boldsymbol{v}_i$ on the j-axis.

This form is chosen over the general solution in the implementation because it is much simpler and should therefore run faster both in simulation and in real-time applications.

4.4 Dynamic modelling

The dynamic modelling of the developped robot is necessary to quantify the required torque to be provided by the actuators. It is also useful for torque control schemes and to run simulations. This section describes in detail the inverse and direct dynamic models.

As for the kinematics, the dedicated software Robotran can be used to generate useful symbolic functions for the dynamic analysis. To take advantage of this, the same separation between the arm-forearm complex with a virtual shoulder (composed of q_{1-3} as seen in Figure 4.1) and the mechanism of the agile eye for the shoulder is considered. Their respective resolutions are shown separately.

All inertial parameters used in the dynamic analysis were obtained from a CAD drawing of the robot assuming full density PLA plastic generally used for 3D printing.

4.4.1 Inverse Dynamics

The objective of the inverse dynamic calculation is to identify the torque required at each of the actuators of the robot given a current position and velocity and a desired acceleration. This information is important in the simulation steps of the project to identify the required characteristics of the actuator that will be used on the physical prototype. Also, the computation of the inverse dynamics can be used in a torque control algorithm.

To compute the inverse dynamics of the whole arm, we first consider the links of the robots between the hand and the end-effector of the agile eye to be rigid. Using the kinematics described in the previous section, we compute the location of the center of mass and the value of the inertia matrix of the end-effector of the agile eye with the remaining of the robot attached to it. Then the inverse dynamics are computed for the agile eye. After that, the inverse dynamics for the rest of the robot can be computed.

Both two parts of the dynamical analysis are detailed in the following subsections.

Shoulder inverse dynamics

The first step to compute the inverse dynamics of the shoulder mechanism is to obtain the inertial parameters of its end-effector. The mass (m[kg]) is simply equal to the sum of the masses of the parts of the robot beyond the second link of the agile eye.

$$m_{end-effector} = m_{humerus} + m_{radius} + m_{ulna} + m_{hand} \tag{4.5}$$

The inertia ($\boldsymbol{I}[kg \cdot m^2]$) matrix of the end effector must be computed at each time step considering the whole arm from the humerus to the hand as rigid. The total inertia tensor is equal to the sum of the inertia tensors of all the bodies beyond the second link of the agile eye expressed in the reference frame of the center of rotation of the agile eye. Those are obtained by invoking transformation matrices and the parallel-axis theorem, as in equation 4.6.

$$\boldsymbol{I}_{end-effector} = \sum_{i}^{n} \left(\boldsymbol{T}_i^T \boldsymbol{I}_i \boldsymbol{T}_i + m_i \boldsymbol{cm}_i' \boldsymbol{cm}_i \right) \tag{4.6}$$

where :

- n is the total number of bodies
- $\boldsymbol{T}_i$ is the transformation matrix between the global reference frame and the frame of body i.
- $\boldsymbol{I}_i$ is the inertia tensor of body i.
- m_i is the mass of body i.
- $\boldsymbol{cm}_i$ is the vector representing the center of mass of body i in the global reference frame.

From there on, the complete inverse dynamic model of the agile eye can be implemented as in [33]. This calculation yields the torque the motors need to provide for a given trajectory. In short, it includes analytical kinematics for each link, which involves two separate over-constrained linear equation systems per motor to be solved numerically. Then, the torque is yielded by applying the Newton-Euler laws of motion and substituting the results of the kinematics.

Arm-forearm complex inverse dynamics

To compute the inverse dynamics for the arm-forearm complex, we need the equations of motion of the system (see eq. 4.7).

$$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{J}^T\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\tau} \tag{4.7}$$

where :

— $\boldsymbol{D}$ is the generalized mass matrix of the mechanism.

— $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ are the joint positions, velocities and accelerations.

— $\boldsymbol{h}$ is a term containing the non-linear effects and gravitational forces.

— $\boldsymbol{J}^T$ is the transposed jacobian matrix of the constraints equation system.

— $\boldsymbol{\lambda}$ is a vector containing Lagrange multipliers.

— $\boldsymbol{\tau}$ is the torque applied on each joint.

This system, along with the loop-closure equations ($\boldsymbol{h_{loop}}$) can be reduced to subsystems with a minimal number of variables using coordinate partitioning as indicated in [30], which can then be solved using a Newton-Euler recursive algorithm.

4.4.2 Direct Dynamics

We are interested in the direct dynamics to simulate the motion of the manipulator, which is necessary to obtain the maximum required actuator output torque. Given the torque applied to the actuators, we can find the angular acceleration of each actuator. This acceleration is then integrated over the time step to obtain the velocities and positions.

Shoulder direct dynamics

Since the inverse dynamics algorithm proposed in [33] requires the numerical solution of two equation systems, it is impossible to simply run the algorithm backwards to obtain the acceleration of the actuators given an applied torque. For this reason, we chose to numerically inverse the inverse dynamics using a non-linear least square optimization algorithm which minimizes relatively to the joint accelerations the difference between the output of the inverse dynamics and the applied torque on each joint, yielding the cost function presented in equation 4.8 :

$$\min_{\ddot{\mathbf{q}}} \quad \left|\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}^*\right|^2 \tag{4.8}$$

where :

— $\boldsymbol{\tau}$ is the applied torque on all the actuators

— $\boldsymbol{\tau}^*$ is the torque computed by the algorithm described in [33] for the inverse dynamics.

— $\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}$ are the positions and velocities of the joints at the previous time step.

— $\ddot{\mathbf{q}}$ are the joint accelerations, which are the optimization variable.

The optimization uses the joint accelerations of the previous time step as an initial step.

To obtain the velocities and positions, the acceleration obtained is integrated over the time step with a zero order integrator, as in equation 4.9.

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{q}} &= \dot{\boldsymbol{q}}_0 + \ddot{\boldsymbol{q}}\Delta t \\ \boldsymbol{q} &= \boldsymbol{q}_0 + \dot{\boldsymbol{q}}\Delta t + \tfrac{1}{2}\ddot{\boldsymbol{q}}\Delta t^2 \end{aligned} \tag{4.9}$$

where :

— $\ddot{\boldsymbol{q}}, \dot{\boldsymbol{q}}, \boldsymbol{q}$ are respectively the accelerations, velocities and positions of each actuators at the current time step.

— $\dot{\boldsymbol{q}}_0, \boldsymbol{q}_0$ are respectively the velocities and positions of each actuators at the previous time step.

— Δt is the time step size.

The resulting algorithm is admittedly computationally inefficient and requires a great amount of computing time depending on the trajectory - about 100× the time required by the inverse dynamics. However, this is of little concern since the simulation is only required to run once to obtain the required specifications for the motors, since for the physical prototype, the direct dynamic does not need to be computed to generate motion.

Arm-forearm complex direct dynamics

The applied torque on each actuator of the biomechanical model with the driven trajectories is deduced from the direct dynamics of the shoulder for the joints q_{1-3}. Therefore, the joint accelerations, velocities and positions are found using an ODE45 solver on MATLAB.

4.5 Control Strategy

To investigate the mechanical limitations of the chosen biomechanical model, determining the type of the input to send to the actuators to follow a trajectory during a simulation as well as with the physical prototype is necessary. This section presents the control algorithm implemented for the simulation and discusses its performance.

Given that the inverse dynamics of the robot is now available, and actually is required to size the actuators on the prototype, we chose to implement a torque control algorithm. Moreover, it is straightforward to implement and yields a minimal response time, but will however cause output peaks at the beginning of the motion. It is worth noting that the simulation of

the motion of the manipulator, described in 4.4.1, neglects external perturbations, position measurement errors and inertial characterization errors. Furthermore, the computation of the inverse dynamics, used in the computed torque algorithm, yields the necessary torque for a given trajectory. Therefore, one can expect the obtained trajectory to be exact.

However, as explained in the previous sections, most of the calculations involved in the kinematics and dynamics are not analytical. This will lead to some numerical errors. For example, the zero order integrator used during the direct dynamics to compute the velocities and positions of the actuators of the agile eye will certainly overshoot or undershoot the result that would be given by a symbolic solution and introduce some delay in the reaction of the system. A simple error in angular velocity at the shoulder could induce a much larger error on the location of the end-effector because of the length of the arm which increases the radius of rotation.

Moreover, as mentioned in section 4.2.2, the robot is underactuated. The passive carrying-angle joint will produce errors on the orientation and position of the end-effector of the robot that will need to be compensated.

For those reasons, we added to the system a PD controller of the form given in eq. 4.10 which regulates the torque output by each actuators proportionally to their respective error in velocity and position relative to their desired values.

$$\boldsymbol{\tau}_{out} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{K}_D(\dot{\boldsymbol{q}}_d - \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{K}_P(\boldsymbol{q}_d - \boldsymbol{q}) \tag{4.10}$$

where :

- $\boldsymbol{\tau}_{out}$ are the torque to output by the actuators.
- $\boldsymbol{\tau}$ are the values of torque obtained with the inverse dynamic.
- $\boldsymbol{K}_D$ and $\boldsymbol{K}_P$ are respectively the derivative and proportional gain matrices.
- $\dot{\boldsymbol{q}}_d$ and $\boldsymbol{q}_d$ are respectively the desired velocities and positions of the joints at the current time step.
- $\dot{\boldsymbol{q}}$ and $\boldsymbol{q}$ are respectively the actual velocities and positions of the joints at the current time step.

Because of the complexity of the system to control, the values of the gain matrices $\boldsymbol{K}_D$ and $\boldsymbol{K}_P$ were chosen by trial and error to keep it stable while minimizing as much as possible the output torque.

4.6 Simulation

To estimate the required torque output at each joint of the manipulator for realistic trajectories, we made a simulation of the robot following the diagram illustrated in Figure 4.6, which incorporates the detail of the kinematics and dynamics elaborated in the previous sections. This section first details the simulation parameters, then presents and discusses the results obtained.

4.6.1 Simulation parameters

With the kinematic and dynamic models along with the design of a controller now available, we designed an arbitrary trajectory to test our design. The said trajectory imposes three components for the position and three Euler angles for the orientation of the end-effector of the robot, i.e. the hand. Each Euler angle is sinusoidal functions of time with frequency up to 2π rad/s and amplitude up to 30°. The position trajectory at time t is given by an equation of the form given by equation 4.11.

$$\boldsymbol{x}(t) = \left(\boldsymbol{x}_2 - \boldsymbol{x}_1 \frac{t_{max} - t}{t_{max}} + \boldsymbol{x}_1\right) \cos(t) \tag{4.11}$$

where :

- $\boldsymbol{x}(t)$ is the desired position of the end-effector at time t.
- $\boldsymbol{x}_i$ are positions part of the workspace of the manipulator.
- t_{max} is the total duration of the simulation.

Those trajectories were chosen to create motion in every direction.

For the chosen trajectory, the simulation executes the kinematics and dynamics of the shoulder and the arm separately as was explained in the previous sections. The overall order of computation is illustrated as a bloc diagram in Figure 4.6.

The initial conditions of the simulation are such that the loop closure constraints are verified, the initial position of the hand corresponds to the desired initial position of the trajectory and the initial velocities and accelerations are all null. The trajectory is inputted to the time loop simulation only one step at a time, as would be the case if it were continuously updated, for example during visual servoing. The time step value was 0.01 s and the total trajectory time was $t_{max} = 10$ s.

The simulation had a few limitations that were of no concern for its purpose but which should be addressed if a more precise and a more detailed analysis of the robot is deemed necessary. Non ideal parameters should be considered, such as inexact inertia or noise in the

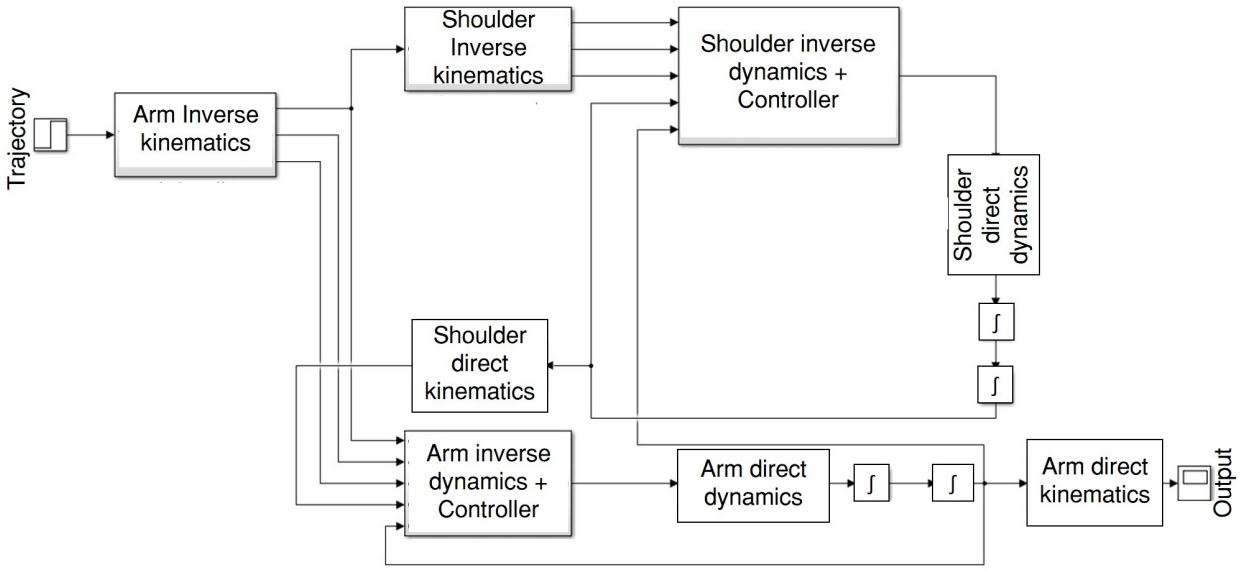

Figure 4.6 Bloc diagram of the simulation

feedback signals. Higher order numerical approximations could be used for example for the direct dynamics of the agile eye. Some approximations on the physical model were also made, namely including the inertia and dimensions of the wrist into the hand and neglecting the impact of friction on the passive joints. Given the small size of the wrist and the relatively low coefficient of friction between plastic parts, those approximations should not change significantly our results.

Additionally, an important part of the computation is made using optimization algorithm, which are time consuming, it takes over 11 hours to run a 10s trajectory simulation using MATLAB, and not adequate for real-time applications. Some investigation should be made to either obtain analytical results or chose the best suited algorithms for each problem. An implementation in a lower level programming language would also reduce the computing time significantly. The main (96%) part of the simulation time is however used to compute the direct dynamics, which is not necessary in a real world implementation and therefore has no impact on our objective.

4.6.2 Control results

Figure 4.7 illustrates the position of the hand of the robot relatively the desired trajectory that was input in the simulation. The trajectory of the end-effector was followed within 3 millimeters for most of the trajectory and was off by only ~ 3 centimeters in the worst case. This error, seen as a sudden deviation in Figure 4.7, is explained by the orientation of the

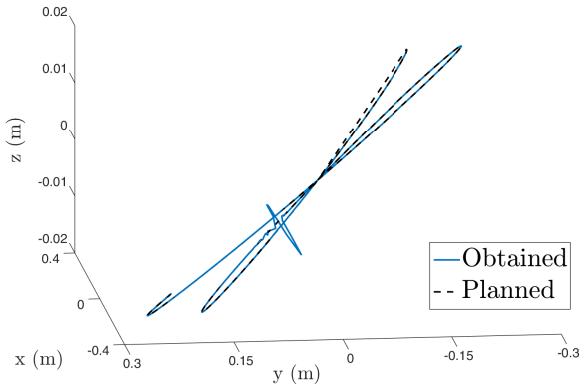

Figure 4.7 Simulated trajectory of the robot end-effector

agile eye which is close to a singularity, the one at the resting position, during about 0.3 s. At this particular position, the input torque is not well transmitted to the end-effector and the resulting trajectory is mostly dictated by the inertia of the robot which is, at that specific moment, flexing the elbow. The subsequent oscillation is a combined consequence of the controller kicking in because of the increased error and the inertia of the robot. This error quickly returns close to zero, as can be observed in Figure 4.8.

Figure 4.8 illustrates the error [rad] in angular positions of each actuator relative to the trajectory obtained by the inverse kinematics. The first important information one can notice in Figure 4.8 is that this error is lower than 5 mrad (0.3°)for most of the simulation and for all of the joints, which is negligible in a real world applications. Setting a very rough estimate of an average position for the actuators at 1 rad, this means that the PD controller brought the joints angle values within 99% of their desired values.

In the context of the simulation, we chose to implement a computed torque algorithm with a PD controller. Since the computation of the output torque was required in the simulation, this choice was only natural. However, in the context of controlling a physical prototype, there are several limitations to the use of such a control algorithm. First of all, precise inertia parameters on an actual prototype are hard to obtain and inexact measurements will yield errors in the results of the inverse dynamics. Moreover, direct torque control on a motor is usually more complex or more expansive than regular speed or position control. Furthermore, as seen in Figure 4.8 the PD controller used was sufficient to stabilize the position of the actuators. However it does not take into account the error on the position of the end-effector due to the passive carrying-angle joint. Since the whole purpose of the simulation and, by extension the controller, was only to estimate the required output torque for each actuator, this is therefore not an issue. On the other hand, an implementation on a physical robot

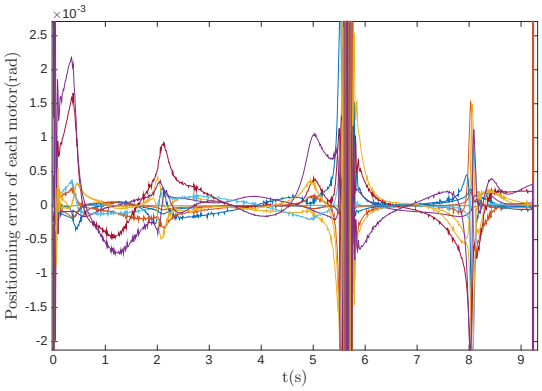

Figure 4.8 Angular trajectory error for each motor

would require a more robust and thought out, possibly position or velocity based, controller.

4.6.3 Required actuator strength

In Figure 4.9 is illustrated the torque (τ $[N{\cdot}m]$) applied on each actuator during the trajectory, which is the main result desired from the simulation. It was expected that the actuators requiring the most output torque would be the ones from the shoulder considering that they share more or less equally, depending on the exact configuration of the robot, the inertia of the whole arm. For the simulated trajectory, it can be observed that this burden was bore by only two actuators, which required about $1Nm$ of torque or less. The other actuators require $0.1Nm$ or less during the trajectory. The required output torque is higher than those numbers at the very start of the trajectory and near the singularity.

The start of the motion requires a high torque because the body of the robot must be put in motion, but also because the initial conditions impose a high velocity error for the controller to compensate, while, as mentioned before, the singularity of the agile eye prevents the efficient transmission of torque from the actuators to the end-effector. However a more elaborate controller (e.g. [34]) or trajectory planner (e.g. [35]) could include a saturation of the output during the initial start of the motion and avoid trajectories that are too close to singularities. With those considerations, it appears that actuators able to provide $1Nm$ for θ_{1-3} and $0.1Nm$ for $q_{4,6,7,10,11}$ are required for the creation of a prototype.

4.7 Physical prototype of the robotic manipulator

The objective of this paper was to create a prototype in the form of a biofidelic manipulator, including specifically the biofidelic kinematic loop from the forearm-bone structure and the

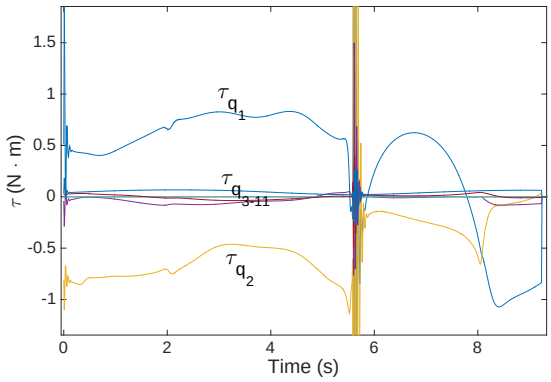

Figure 4.9 Torque applied to each motor during trajectory

kinematic chain of the human upper-limb. In the previous sections, the design choices and calculations necessary to build such a robot were detailed. In this section, we provide necessary guidelines to build a prototype using 3D printing. This will also allow us to compare the range of motion of our prototype to that of a typical human arm to validate the design.

The manipulator was built using rapid prototyping methods. Most of the parts were 3D printed with full density PLA plastic. In the context of building a robot, minimizing the density should be a priority to reduce the inertia of the robot, which in turn would reduce the size of its actuators and its energy consumption. However, given the generally long and thin geometry of most parts of the robot, we favoured increasing the strength of the structure over the efficiency of the mechanism for the prototype. The base of the robot was printed at a 35% density since it should not experience significant torsion. Further, the humerus was made as a shell because its diameter was deemed large enough to bear the possible bending. The resulting shell not only significantly reduces the inertia of the robot, but was also chosen as a convenient protection for part of the wiring and electronics. The prototype is illustrated in Figure 4.10.

It is worth mentioning that fast prototyping methods such as 3D printing offer some flexibility in the design process of which we can use for our advantage. Specifically, we were able to print the whole elbow as a single pre-assembled part without losing any DoF. This is very convenient because it allows designs requiring less attachment pieces such as screws and circlips and also pre-aligns perfectly axes which would be harder to do manually. In particular, it allowed us to fix the ulna to its axis of rotation without having to first remove the axis from the elbow. It also allowed the assembly of the translational DoF (q_5 in Figure 4.1) without attachment pieces.

Actuators for the prototype were chosen for their maximum torque output according to the

Figure 4.10 Physical prototype of the mechanism

results presented in Figure 4.9 in the previous section. Also, we used servo-motors for each actuator which are a ready-to-use solution for most applications. They are not compatible with torque control, as was designed in the simulation, however they are extremely simple to use and implement in an open-loop fashion which allows easy point-to-point trajectories to reach specific configurations. For that reason, servo-motors seemed more convenient. Specifically, we chose :

— The FS6535M giant scale servo for the three actuators of the agile eye
— The GS9025MG Goteck servo for the adduction-abduction angle at the wrist
— The HS-645MG HITEC servo for the rest of the actuators

The actuators are controlled via an Arduino chip which is connected through a serial port to a computer which can compute the inverse kinematics and send the required actuator positions.

Additionally, it appeared that the carrying-angle, left passive rather than actuated as a design choice, makes the movement less smooth than expected. Preliminary qualitative tests indicate that fixing the angle fixes the problem, without significantly changing the humanlike look of the motion. The exact value to fix the carrying-angle is application specific as its mean value depends on the movement to imitate and therefore is left as a design parameter for future applications.

To validate that humanlike motion should be feasible with the robot, we compared the range of motion available at each joint of the robot to the corresponding active joint range of the

human body. These results are summarized in Table 4.2.

Tableau 4.2 Comparison between the robot and biological joint ranges

Joint	Robot range[°]	Biological range [21] [°]
q_1	[-30, 30]	[-90, 90]
q_2	[-60, 60]	[-90, 120]
q_3	[-60, 60]	[-60, 120]
q_4	[-90, 75]	[-90, 55]
q_7	[-90, 75]	[-90, 85]
q_{10}	[-90, 90]	[-85, 85]
q_{11}	[-90, 90]	[-45, 15]

Comparing the results shown in Table 4.2, it can be seen that the biological range of the joints is accessible to the robot except for the range of motion of the shoulder (joints q_{1-3}). The design of the shoulder was chosen as a parallel manipulator to maximize the strength and accuracy of the mechanism, but did however reduce the available workspace compared to a serial mechanism. The specific choice of the agile eye is nevertheless the best choice of SPM because it is designed to have the largest available workspace for a SPM.

Another exception is the PS joint (q_7), which can not complete the last 10° for a complete pronation motion because the actuator enters in contact with the radius. We chose the HS-645MG servo as a good compromise between the actuator's strength and its price and are satisfied with its use, but should the full pronation motion be necessary, a smaller and, generally, more expansive actuator should be used to allow a complete 90° motion of pronation.

Considering that the rest of the joints can reach all the biological positions, it can be concluded that the motion of the robot from the humerus forward to the hand should be able to recreate humanlike motion. Overall this means that the manipulator can replicate human movements where the shoulder is close to its resting position. This is not considered an important limitation because most practical and natural movements keep the shoulder close to its resting position, since using the whole workspace of the shoulder produce wide and inefficient movements.

4.8 Conclusion

The objective of this paper was to design a robotic development platform in the form of a biofidelic robotic manipulator. We designed a manipulator based on a biomechanical model of the upper limb and then computed the kinematics, dynamics and other informations

necessary to operate this robot, which were used for a simulation and the construction of a full-sized prototype. A full-sized prototype was built that can reproduce the human motion range for movements with the shoulder close to resting position. It also highlighted that fixing the passive carrying-angle joint was necessary to obtain a smooth motion.

Our prototype can now be used as a platform to develop assistance-related softwares : redundancy optimization algorithms could be implemented to generate trajectories according to a human-motion related criterion and control interfaces such as direct manipulation, eye tracking or augmented reality can be realized. Such a platform opens a door for development in many fields of application such as rehabilitation robotics, tele-manipulation and social robotics.

Acknowledgements

The authors are grateful to FRQNT/INTER, NSERC and the MEDITIS program for their financial support during the projet. Additionally, we would like to thank Julie Timsit for her implication in the early CAD design part of the project.

References

[1] M. Sitti, A. Menciassi, A. J. Ijspeert, K. H. Low et S. Kim, "Survey and introduction to the focused section on bio-inspired mechatronics", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, t. 18, n° 2, p. 409–418, 2013.

[2] J. Hofschulte, M. Seebode et W. Gerth, "Parallel manipulator hip joint for a bipedal robot", in *Climbing and Walking Robots*, Springer, 2005, p. 601–609.

[3] D. Shapiro, "Development of a Biofidelic Artificial Arm for a Martial Arts Dummy", mém.de mast., University of Washington, 2011.

[4] M. Controzzi, C. Cipriani, B. Jehenne, M. Donati et M. C. Carrozza, "Bio-inspired mechanical design of a tendon-driven dexterous prosthetic hand", in *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, IEEE, p. 499–502.

[5] B. R. Duffy, "Anthropomorphism and the social robot", *Robotics and autonomous systems*, t. 42, n° 3, p. 177–190, 2003.

[6] J. Koenemann, F. Burget et M. Bennewitz, "Real-time imitation of human whole-body motions by humanoids", in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, IEEE, p. 2806–2812.

[7] Y. Sodeyama, I. Mizuuchi, T. Yoshikai, Y. Nakanishi et M. Inaba, "A shoulder structure of muscle-driven humanoid with shoulder blades", in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, p. 4028–4033.

[8] J.-A. Meyer et A. Guillot, "Biologically inspired robots", in *Springer Handbook of Robotics*, Springer, 2008, p. 1395–1422.

[9] S. K. Mustafa, G. Yang, S. H. Yeo, W. Lin et I.-M. Chen, "Self-calibration of a biologically inspired 7 DOF cable-driven robotic arm", *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, t. 13, n° 1, p. 66–75, 2008.

[10] P. Dario, E. Guglielmelli, C. Laschi et G. Teti, "MOVAID : a personal robot in everyday life of disabled and elderly people", *Technology and Disability*, t. 10, n° 2, p. 77–93, 1999.

[11] S. Kagami, K. Nishiwaki, J. J. Kuffner Jr, T. Sugihara, M. Inaba et I. Hirochika, "Design, implementation, and remote operation of the humanoid H6", in *Experimental Robotics VII*, Springer, 2001, p. 41–50.

[12] K. Kaneko, K. Harada, F. Kanehiro, G. Miyamori et K. Akachi, "Humanoid robot HRP-3", in *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, p. 2471–2478.

[13] S. Rader, L. Kaul, H. Fischbach, N. Vahrenkamp et T. Asfour, "Design of a high-performance humanoid dual arm system with inner shoulder joints", in *Humanoid Robots (Humanoids), 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on*, IEEE, p. 523–529.

[14] M. Laitenberger, M. Raison, D. Périé et M. Begon, "Refinement of the upper limb joint kinematics and dynamics using a subject-specific closed-loop forearm model", *Multibody System Dynamics*, t. 33, n° 4, p. 413–438, 2015.

[15] D. Patkó et A. Zelei, "Kinematic Redundancy Resolution in Robotics and in Human Motion–An Experimental Case Study", in *The fourth joint International conference on Multibody System Dynamics*.

[16] A. Freivalds, *Biomechanics of the upper limbs : mechanics, modeling and musculoskeletal injuries*. CRC press, 2011.

[17] M. Mokhtari, M. A. Feki, B. Abdulrazak et B. Grandjean, "3 toward a human-friendly user interface to control an assistive robot in the context of smart homes", in *Advances in Rehabilitation Robotics*, Springer, 2004, p. 47–56.

[18] *Franka Emika*, [Online] https ://www.franka.de/, 2016. adresse : `https://www.franka.de/`.

[19] V. Maheu, P. S. Archambault, J. Frappier et F. Routhier, "Evaluation of the JACO robotic arm : Clinico-economic study for powered wheelchair users with upper-extremity disabilities", in *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on*, IEEE, 2011, p. 1–5.

[20] S. Duprey, A. Naaim, F. Moissenet, M. Begon et L. Chèze, "Kinematic models of the upper limb joints for multibody kinematic optimisation : an overview", *Journal of Biomechanics*, 2016.

[21] M. Laitenberger, "Approche intégrée de modélisation cinématique et dynamique du membre supérieur", thèse de doct., École Polytechnique de Montréal, 2013.

[22] R. M. Ehrig, W. R. Taylor, G. N. Duda et M. O. Heller, "A survey of formal methods for determining the centre of rotation of ball joints", *Journal of biomechanics*, t. 39, n° 15, p. 2798–2809, 2006.

[23] R. M. Ehrig, W. R. Taylor, G. N. Duda et M. O. Heller, "A survey of formal methods for determining functional joint axes", *Journal of biomechanics*, t. 40, n° 10, p. 2150–2157, 2007.

[24] L. Yan, I.-M. Chen, G. Yang et K.-M. Lee, "Analytical and experimental investigation on the magnetic field and torque of a permanent magnet spherical actuator", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, t. 11, n° 4, p. 409–419, 2006.

[25] D. Marco, L. Torfason et D. Tesar, "Computer simulation and design of a three degree-of-freedom shoulder module", 1989.

[26] K. Al-Widyan, X. Q. Ma et J. Angeles, "The robust design of parallel spherical robots", *Mechanism and Machine Theory*, t. 46, n° 3, p. 335–343, 2011.

[27] Z. J. Liang Zhang et S. Li, "Dynamic modeling and Analysis of a Novel 3-RRR Parallel Shoulder", *Journal of SoftwareEngineering*, t. 9, n° 4, p. 773–784, 2015.

[28] C. M. Gosselin et J.-F. Hamel, "The agile eye : a high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device", in *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*, IEEE, p. 781–786.

[29] I. A. Bonev, D. Chablat et P. Wenger, "Working and assembly modes of the Agile Eye", in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, IEEE, p. 2317–2322.

[30] J.-C. Samin et P. Fisette, *Symbolic modeling of multibody systems*. Springer Science & Business Media, 2013, t. 112.

[31] J.-P. Merlet, "Direct kinematics of parallel manipulators", *IEEE transactions on robotics and automation*, t. 9, n° 6, p. 842–846, 1993.

[32] C. Gosselin et M. Gagné, "A closed-form solution for the direct kinematics of a special class of spherical three-degree-of-freedom parallel manipulators", in *Computational Kinematics 95*, Springer, 1995, p. 231–240.

[33] C. Gosselin et M. Gagne, "Dynamic models for spherical parallel manipulators", in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, Milan, Italy*, 1995.

[34] R. V. Patel, H. A. Talebi, J. Jayender et F. Shadpey, "A robust position and force control strategy for 7-DOF redundant manipulators", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, t. 14, n° 5, p. 575–589, 2009.

[35] P. K. Artemiadis, P. T. Katsiaris et K. J. Kyriakopoulos, “A biomimetic approach to inverse kinematics for a redundant robot arm”, *Autonomous Robots*, t. 29, n° 3-4, p. 293–308, 2010.

CHAPITRE 5 MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES

L'article présenté au Chapitre 4 présentait de façon concise les différentes étapes passées dans la conception du manipulateur robotique anthropomorphique, se concentrant sur l'information essentielle en négligeant les détails. Ce chapitre présente d'abord les grandes lignes du travail accompli et présenté dans l'article, puis explique avec plus de détails des éléments de méthodologie qui ont été omis au chapitre précédent pour des raisons de concision. Certains résultats complémentaires associés à ces démarches sont également présentés.

5.1 Résumé du travail accompli

Dans l'ensemble, ce projet de recherche peut être résumé en dix grandes étapes :

1. **Choix du modèle biomécanique :** Basé sur la revue de littérature, le nombre typique de degrés de liberté nécessaire au fonctionnement du bras humain et au fonctionnement d'un assistant robotique, la précision nécessaire au mouvement et la non-nécessité d'inclure les muscles dans le modèle ont conduit à utiliser le modèle biomécanique de Laitenberger [97] comme base de la chaîne cinématique du manipulateur.
2. **Caractérisation du modèle biomécanique :** 13 caractéristiques (indiquées au Tableau 4.1) concernant la chaîne cinématique et la géométrie du modèle biomécanique ont été identifiées pour reproduire correctement sa structure.
3. **Conversion des caractéristiques du modèle biomécanique en mécanismes :** Les 13 caractéristiques identifiées précédemment ont été intégrées dans les choix de design des trois structures articulaires - l'épaule, le coude et le poignet.
4. **Production d'un dessin technique :** Combinaison des mécanismes conçus à l'étape précédente dans un dessin assisté par ordinateur fait avec le logiciel CATIA.
5. **Calcul de la cinématique du mécanisme :** Séparation des cinématique de l'épaule et du reste du bras permettant d'utiliser d'un côté les résultats de Gosselin [66] et de l'autre de faire appel au logiciel de modélisation Robotran [119]. Calcul de la cinématique inverse par optimisation avec contraintes non-linéaires.
6. **Calcul de la dynamique du mécanisme :** Séparation des dynamiques inverse de l'épaule et du reste du bras permettant d'utiliser d'un côté les résultats de Gosselin [68] et de l'autre de faire appel au logiciel de modélisation Robotran.
7. **Conception d'un algorithme de contrôle :** Design d'un contrôleur PD avec couple pré-calculé utilisant les résultats de la dynamique inverse. Les gains du contrôleur ont

été trouvés par essai-erreur pour stabiliser le système.

8. **Simulation de suivi de trajectoire :** Intégration des étapes 5-7 dans une simulation faite par MATLAB (Mathworks, USA) pour valider le contrôleur conçu et déterminer le couple maximal nécessaire à chacun des joints afin de choisir des actionneurs
9. **Construction d'un prototype :** Utilisation de l'impression 3D pour produire les pièces dessinées à l'étape 4. Assemblage du robot.
10. **Validation :** Comparaison des plages angulaires accessibles aux joints du manipulateur avec celles d'un bras humain.

5.2 Résultats complémentaires de la simulation de suivi de trajectoire

L'objectif de cette section est de présenter les résultats obtenus de la simulation qui n'ont pas pu apparaître dans l'article au Chapitre 4 pour des raisons de concision. Ces résultats avaient été omis car, bien qu'ils soient intéressants, ils ne contribuent pas à valider l'atteinte des objectifs décrits spécifiques à l'article.

5.2.1 Suivi de trajectoire en orientation

Dans un premier lieu, l'article n'avait présenté que les résultats du suivi de trajectoire en position. La Figure 5.1 illustre le suivi de trajectoire en orientation du manipulateur d'après les trajectoires désirées décrites par l'équation A.3. Dans l'ensemble, on y voit que la trajectoire est suivie avec précision à l'exception d'une brève oscillation d'une durée de 0.4 s débutant à 5.5 s du début de la simulation, identifiée dans l'article comme le passage près d'une singularité. L'erreur relative entre les angles d'Euler obtenus $(\alpha_z, \alpha_y, \alpha_x)$ et leurs valeurs désirées $(\alpha_{z_d}, \alpha_{y_d}, \alpha_{x_d})$ sont respectivement 98.9%, 7.6% et 4.7%. Une autre déviation d'une durée de 0.01 s se produit à 9.23 s du début de la simulation.

5.2.2 Vitesses et accélérations

Dans un second lieu, l'article n'avait pas inclut d'information relative à la vitesse et l'accélération de l'effecteur pendant la trajectoire. Ces informations sont pertinentes pour déterminer si la trajectoire peut être considérée comme représentative d'une trajectoire quelconque dans un contexte de robotique d'assistance.

La Figure 5.2 illustre la vitesse de l'effecteur ($|\mathbf{v}|$) et sa projection sur chaque axe cartésien (v_x, v_y, v_z). Les conditions initiales sont telles que la vitesse initiale est nulle et, comme il était possible de le déduire de la forme de la trajectoire décrite par l'équation A.2, la vitesse

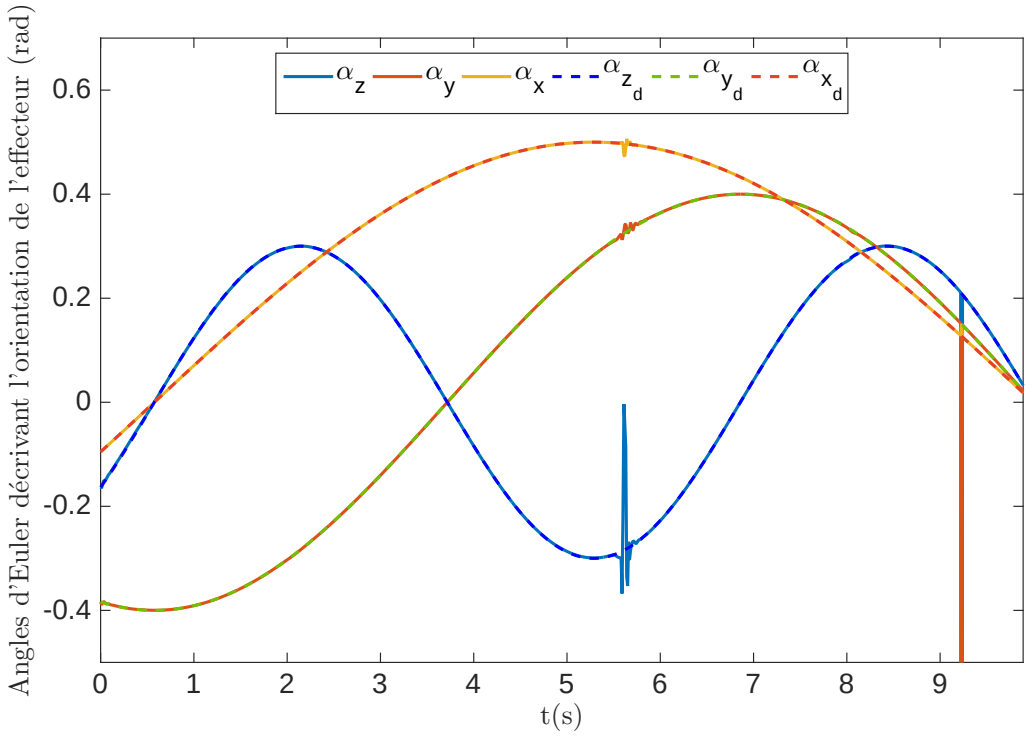

Figure 5.1 Comparaison des angles d'Euler obtenus pour l'orientation de l'effecteur avec l'orientation désirée pendant la simulation

a un profil sinusoïdal. Il y a une oscillation très rapide de la vitesse dans toutes les directions entre 5.5 s et 5.9 s. La valeur maximale des vitesses dans chacune des directions si on néglige ces oscillations est de 0.24 m/s, 0.18 m/s et 0.02 m/s selon les axes x, y, z respectivement. La vitesse absolue maximale est de 0.34 m/s.

La Figure 5.3 illustre l'accélération de l'effecteur ($|a|$) et sa projection sur chaque axe cartésien (a_x, a_y, a_z). Les conditions initiales sont telles que l'accélération initiale est nulle et, comme il était encore une fois possible de le déduire de la forme de la trajectoire décrite par l'équation A.2, l'accélération a un profil sinusoïdal. Il y a des oscillations très rapides de grande amplitude pendant les premières 0.25 s de la simulation et entre 5.5 s et 5.9 s ainsi que des oscillations d'amplitude moindre entre 8.0 s et 8.4 s.

La Figure 5.4 illustre la vitesse de variation de l'orientation de l'effecteur ($|w|$) et sa composante pour chaque axe défini par la convention d'Euler (w_z, w_y, w_x). Les conditions initiales sont encore une fois nulles et le profil est sinusoïdal. Il existe des oscillations sur les mêmes plages de temps que celles énoncées relativement à l'accélération. Le profil des vitesses angulaires est significativement plus bruité que celui des vitesses cartésiennes présentées à la Figure 5.2. La vitesse angulaire maximale est de 0.37 rad/s.

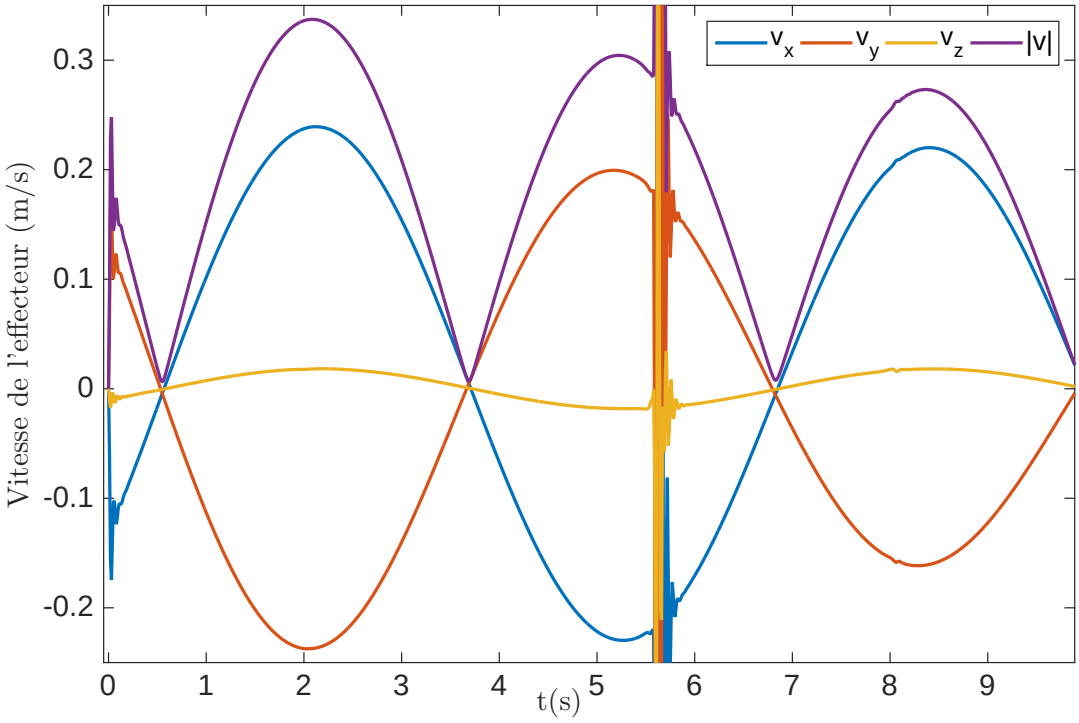

Figure 5.2 Vitesse de l'effecteur pendant la trajectoire

L'accélération associée à la variation de l'orientation de l'effecteur n'est pas illustrée parce que son profil est trop bruité pour en tirer de l'information pertinente.

5.3 Construction du prototype

L'article présenté au Chapitre 4 indique que le prototype a été construit grâce à l'impression 3D, mais ne détaille pas les étapes ni les paramètres d'impression. Cette section présente donc les informations nécessaires au design de certaines pièces faites sur mesure, au prototypage rapide des pièces du robot et détaille son assemblage.

5.3.1 Prototypage rapide

À l'exception des pièces d'attache, comme les vis et les boulons, ainsi que l'électronique, le prototype est entièrement imprimé en 3D. Cette décision a été prise étant donné le faible coût des matériaux, la vitesse de production des pièces, la légèreté ainsi que la flexibilité que l'impression 3D offre au design qui n'est pas toujours possible d'obtenir lorsqu'on fait

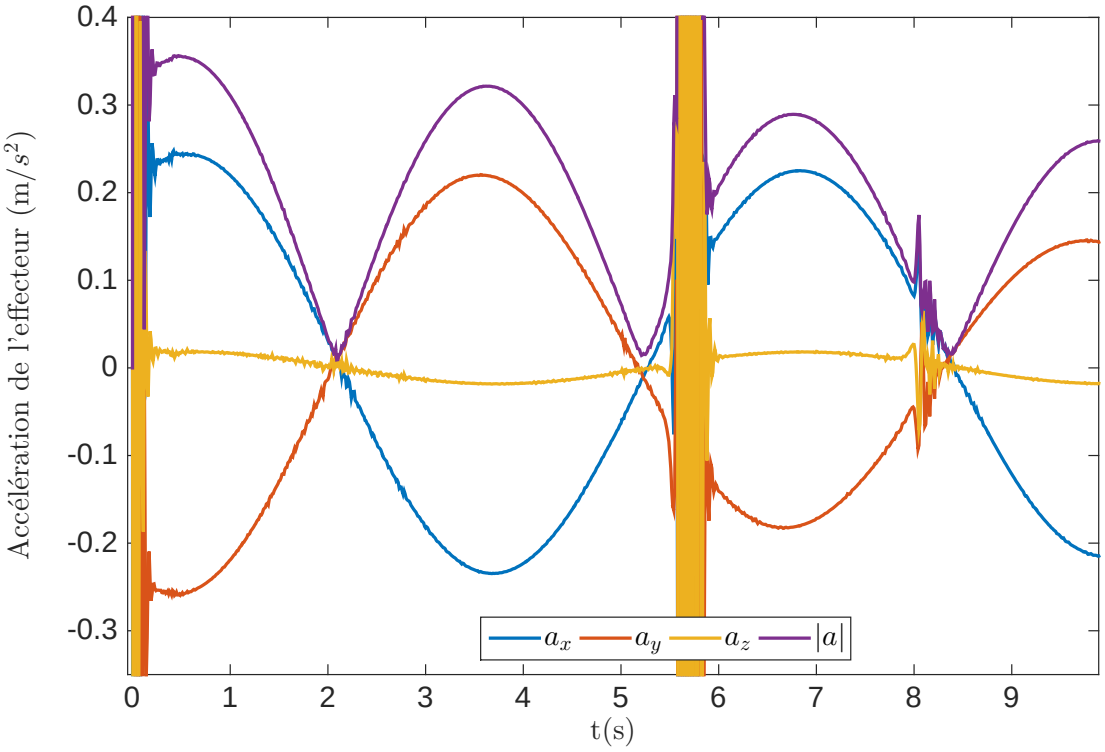

Figure 5.3 Accélération de l'effecteur pendant la trajectoire

des pièces à l'aide de moules. En bref, cela offre la possibilité d'amener des modifications au design plus simplement ne nécessitant pas la production de moules supplémentaires tout en maintenant les pertes à un coût minimum. Ce choix de méthode de prototypage vient cependant avec deux désavantages. D'une part, l'espace de travail des imprimantes 3D ne permet pas de produire des pièces de grande taille. D'autre part, le plastique, plus particulièrement le PLA dans le cadre de ce projet, est moins solide que d'autres matériaux utilisés pour des produits commerciaux comme la fibre de carbone ou l'aluminium [123].

Certaines règles de bonne pratique sont à suivre lorsqu'on fait de l'impression 3D [124], mais dans l'ensemble la qualité d'impression dépend de la qualité de l'équipement utilisé et de l'expérience de la personne qui imprime pour ajuster les paramètres en fonction de la pièce. Quelques unes de ces règles sont :

— Ajuster les plans pour prendre en compte la diminution de la taille des trous lors de l'impression, environ 0.3 mm d'augmentation du diamètre pour les trous servant à fixer des pièces (ex : trous de vis) et 0.5 mm pour les trous joignant des pièces mobiles (ex : axes de rotation)

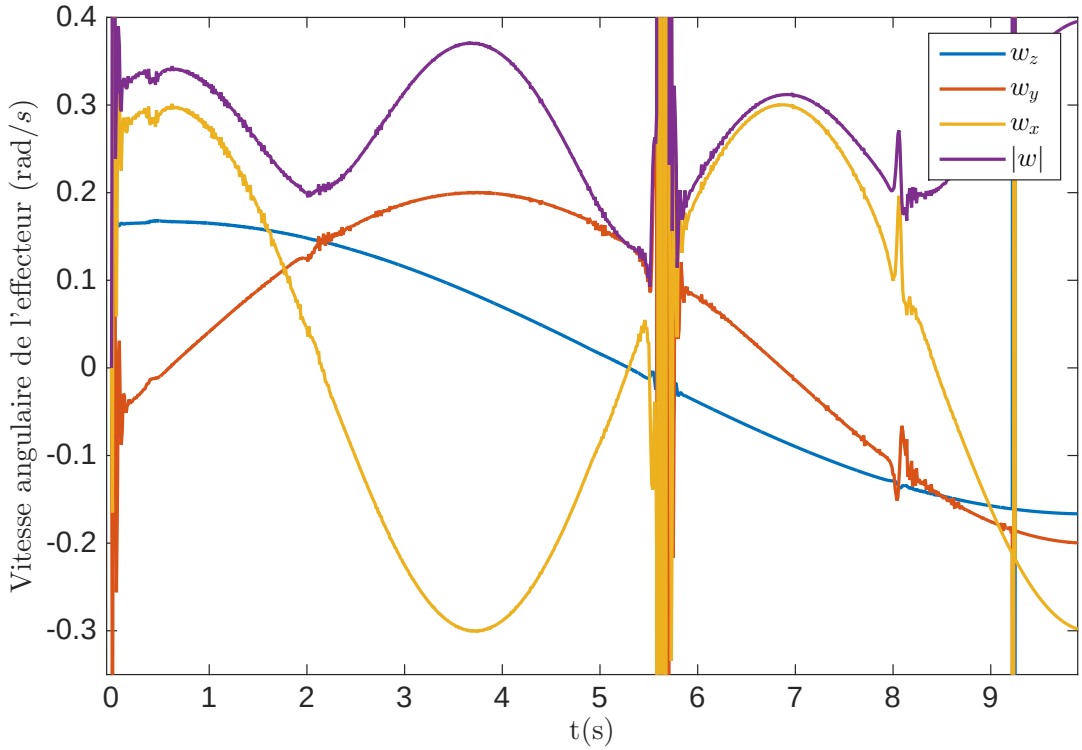

Figure 5.4 Vitesse angulaire de l'effecteur pendant la trajectoire

— Lorsque possible, imprimer la pièce avec une surface plane sur le lit d'impression.
— Limiter au maximum la nécessité de supports, utilisés pour éviter que du plastique ne soit déposé "dans le vide", puisqu'ils ont tendance à diminuer la qualité du fini.

La grande majorité des pièces a été imprimée en suivant ces consignes en utilisant un remplissage complet pour maximiser la solidité de la structure. Quelques pièces avaient cependant des particularités qui ont fait en sorte qu'il a fallu procéder à certains ajustements des plans ou de la méthode d'impression. Ces particularités sont énumérées dans le Tableau 5.1.

5.3.2 Personnalisation des pièces et actionneurs

La structure générale du manipulateur robotique ne laisse pas beaucoup de place à la personnalisation puisque les membrures doivent imiter des os et que l'agile eye est un mécanisme entièrement défini, quoique complexe (voir Annexe B). Certains ajustements doivent néanmoins être faits sur le modèle pour accommoder les pièces achetées entières. Cela inclut évidemment les vis d'assemblage, mais aussi les différents moteurs ainsi que l'humérus. Cette section présente les parties du design des pièces qui sont dépendantes des pièces achetées en-

Tableau 5.1 Remarques concernant l'impression de pièces du prototype

Pièce	Remarque
Support à moteur de l'agile eye	Remplissage à 35% pour économiser du temps et du plastique. Pièce non soumise à des contraintes et exclue de la dynamique.
Base de l'agile eye	Remplissage à 35% pour économiser du temps et du plastique. Pièce non soumise à des contraintes et exclue de la dynamique
Première membrure de l'agile eye	Pièce séparée en deux arcs de cercle pour créer une surface qui permet l'impression à plat sans utiliser de supports
Humérus	Tuyau de plastique acheté à la quincaillerie et taillé aux bonnes dimensions
Coude	Support à moteur, axe de FE et attachement de l'ulna imprimé assemblé en une seule pièce pour éviter des pièces d'attache supplémentaires
Ulna	Pièce imprimée en deux partie car trop longue pour l'espace de travail de l'imprimante
Radius	Pièce imprimée en deux partie car trop longue pour l'espace de travail de l'imprimante

tières afin de pouvoir effectuer les ajustements nécessaires en cas de modification du design.

La première caractéristique à considérer est la taille des moteurs, puisque celle-ci pourrait changer dans de futures étapes du projet. Des espaces désignés sur mesure pour y fixer les moteurs sont conçus pour positionner avec précision les axes de rotation des moteurs. Ces points d'attache sont aussi conçus pour laisser un espace permettant de faire passer correctement le filage électrique. Or, un changement du choix des moteurs dans le design pourrait modifier la dimension du moteur, la position de son axe de rotation et sa sortie électrique. Ces points d'attache sont illustrés sur la Figure 5.5 pour le poignet, mais un autre existe également au niveau du moteur du coude.

Les moteurs à la base du bras possèdent également un support fait sur mesure servant à positionner l'axe de rotation du moteur avec les axes de rotation de l'agile eye. Ces mêmes supports à moteur ont aussi pour fonction pour l'instant d'être le pied de la base du robot et doivent par conséquent avoir des dimensions assez grandes pour que le robot reste stable. Cette obligation pourra être modifiée dans de futures étapes du projet qui pourront nécessiter de fixer fermement le robot, par exemple sur un fauteuil roulant dans un contexte d'assistance

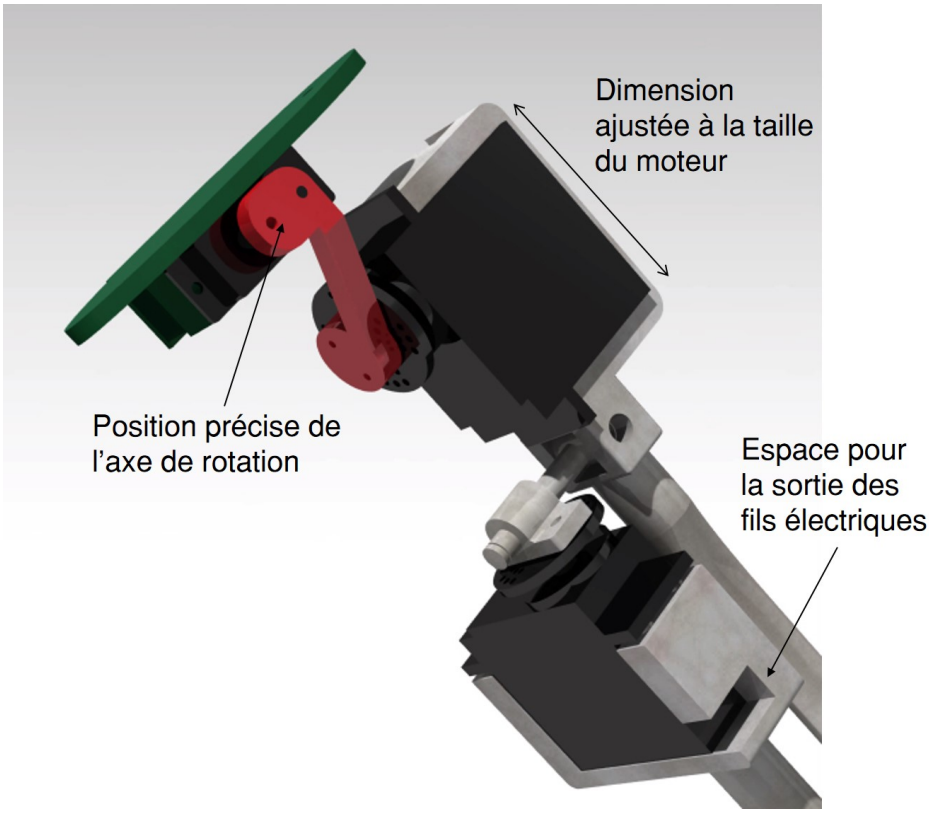

Figure 5.5 Ajustement des pièces en fonction des dimensions des moteurs

en réadaptation.

Enfin, l'autre pièce critique est l'effecteur de l'agile eye. En effet, d'une part, l'agile eye peut être construit à plusieurs échelles de grandeur en fonction du compromis désiré entre la solidité des pièces et la commodité du mécanisme (voir Annexe B). Or, contrairement au reste des pièces, il n'y a pas de relation directe entre l'échelle de grandeur et l'effecteur. Il faut concevoir la pièce dans le contexte de l'assemblage de l'agile eye et la tailler pour faire en sorte qu'elle ne provoque pas d'accrochage avec les membrures distales du mécanisme pendant le mouvement. D'autre part, l'humérus tel qu'il est actuellement conçu est un simple tuyau de plastique acheté à la quincaillerie. Il s'ensuit donc que le diamètre du trou permettant de joindre l'effecteur de l'agile eye à l'humérus doit être compatible avec le diamètre de l'humérus. Le design actuel de l'effecteur de l'agile eye est illustré sur la Figure 5.6.

5.3.3 Assemblage

Cette section présente la méthode permettant l'assemblage des différentes pièces imprimées en 3D, incluant le choix des diverses pièces d'attache comme les vis et les boulons. Il va de soit

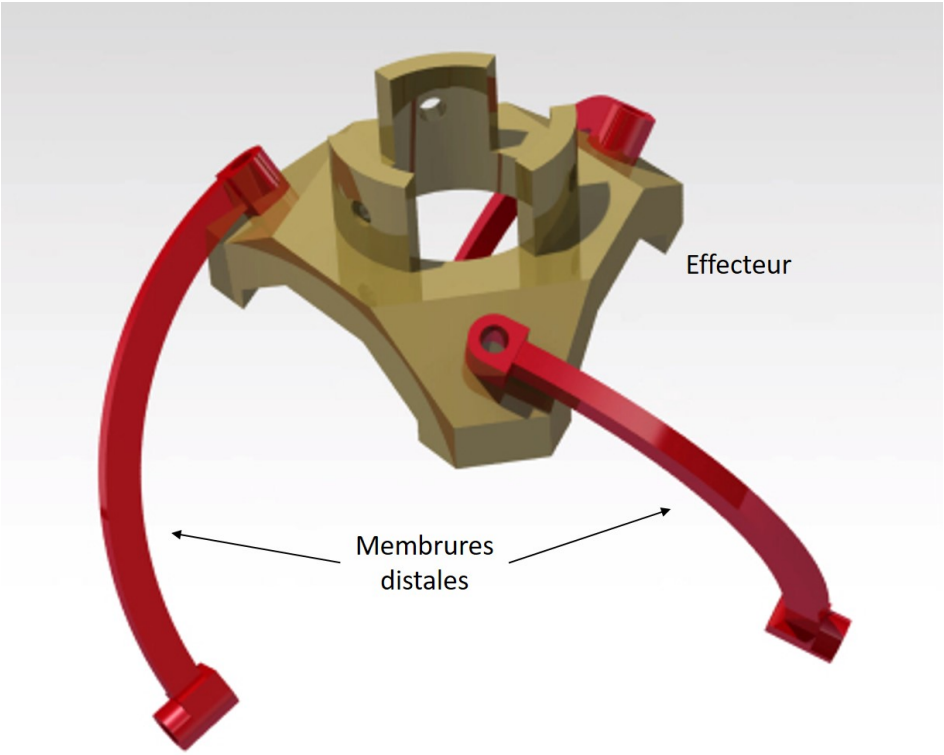

Figure 5.6 Design actuel de l'effecteur de l'agile eye

que les vis doivent être de longueur et de diamètre conséquents en fonction des dimensions du prototype et de la taille des trous. Cela ne sera donc pas répété à chaque étape de l'assemblage. Pour chaque groupe d'étapes une figure illustrant l'assemblage et identifiant les pièces sera présentée. Pour des raisons de concision, ces étapes sont énoncées en prenant en considération que le plan du robot est accessible à celui qui les suit afin d'identifier les points de contact et le sens correct des pièces.

1. **Assembler la base du robot.**

   1.1. Fixer à la base de l'agile eye les trois supports à moteur et les trois joints rotatifs à l'aide de vis.

   1.2. Insérer les transmissions dans les joints rotatifs puis placer les moteurs sur les supports en s'assurant de sortir le filage électrique par les trous prévus à cet effet.

   La base assemblée devrait être telle qu'illustrée sur la Figure 5.7.

2. **Assembler l'agile eye**

   2.1. Attacher les trois membrures distales à l'effecteur de l'agile eye à l'aide de vis

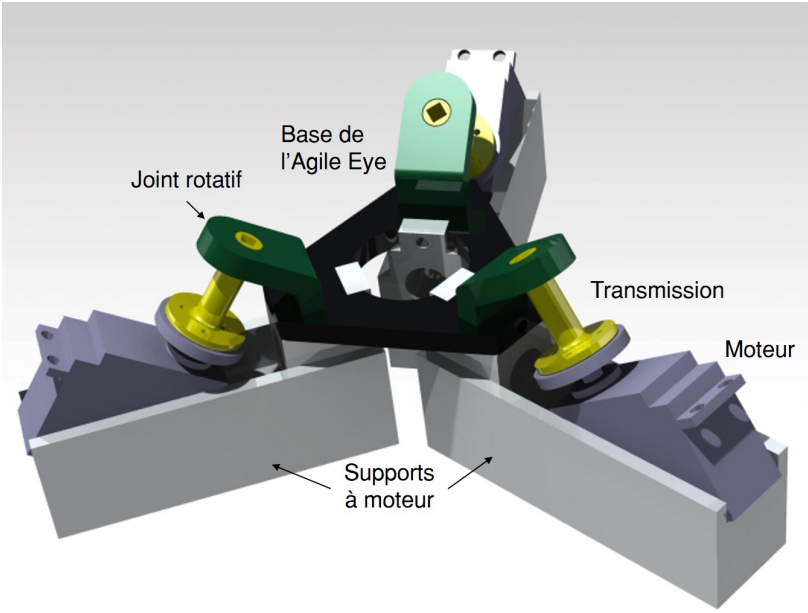

Figure 5.7 Identification des pièces de la base du robot

Chicago.

2.2. Fixer ensemble les deux parties des membrures proximales de l'agile eye à l'aide de vis ou de colle forte.

2.3. Attacher les membrures proximales aux membrures distales à l'aide de vis Chicago.

2.4. Fixer les membrures proximales aux transmissions à la base à l'aide de tiges d'aluminium carrées. Ces tiges peuvent être achetées dans n'importe quelle boutique de hobbyisme (qui vendent par exemple des maquettes ou des modèles réduits à assembler).

L'Agie Eye assemblé devrait être tel qu'illustré sur la Figure 5.8.

3. **Assemblage de l'humérus et du coude**

3.1. Fixer à l'aide de vis l'humérus dans le trou de l'effecteur de l'agile eye prévu à cet effet.

3.2. Fixer à l'aide de vis le coude à l'autre extrémité de l'humérus.

3.3. Insérer le joint sphérique du radius dans la cavité prévue à cet effet.

3.4. Insérer le côté proximal de l'ulna dans le connecteur prévu à cet effet tel que la dimension la plus longue du moteur au côté distal de l'ulna soit perpendiculaire à l'axe de FE du coude. Fixer avec de la colle forte.

3.5. Insérer le moteur au coude de manière à pouvoir actionner l'axe de FE du coude.

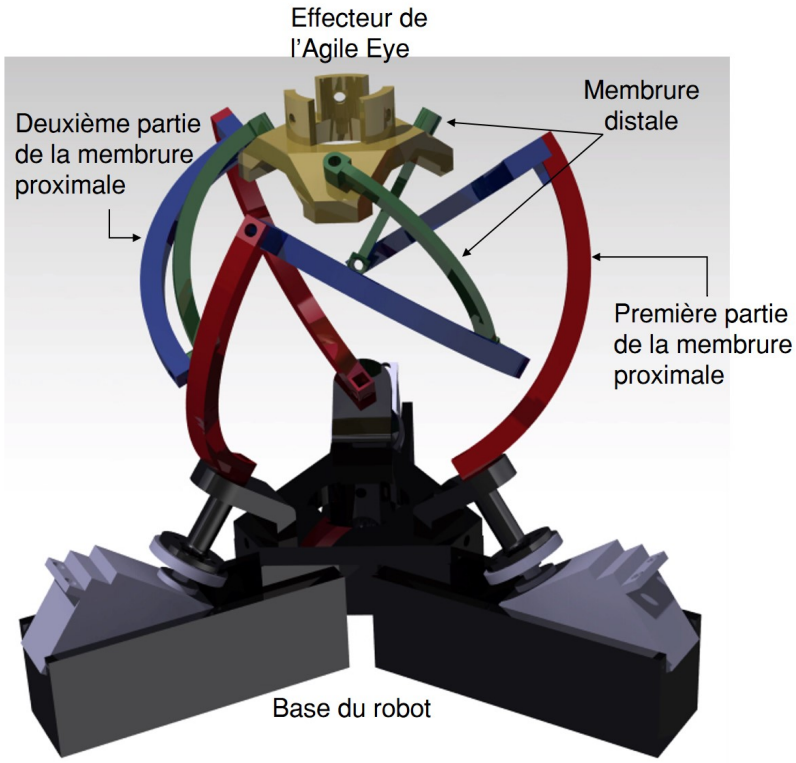

Figure 5.8 Identification des pièces de l'agile eye

Le coude assemblé devrait être tel qu'illustré sur la Figure 5.9.

4. **Assemblage du poignet**

   4.1. Insérer les moteurs du coté distal du radius et de l'ulna dans les espaces prévus à cet effet.

   4.2. Fixer la pièce q_8 sur le moteur au bout de l'ulna à l'aide de vis.

   4.3. Attacher la pièce q_9 dans le trou prévu à cet effet du côté distal du radius à l'aide d'une vis Chicago.

   4.4. Insérer l'axe de la pièce q_9 dans le trou de la pièce q_8 et attacher à l'aide d'un anneau élastique.

   4.5. Fixer le poignet au moteur situé au bout du radius à l'aide de vis.

   4.6. Fixer le dernier moteur à l'attache-main/l'effecteur.

   4.7. Fixer l'axe de rotation du moteur de la main au poignet à l'aide de vis.

   Il est à noter que les pièces q_8 et q_9 correspondent aux joints du modèle biomécanique avec la même nomenclature. Elles n'ont pas d'équivalent physiologique. Le poignet assemblé devrait être tel qu'illustré sur la Figure 5.10.

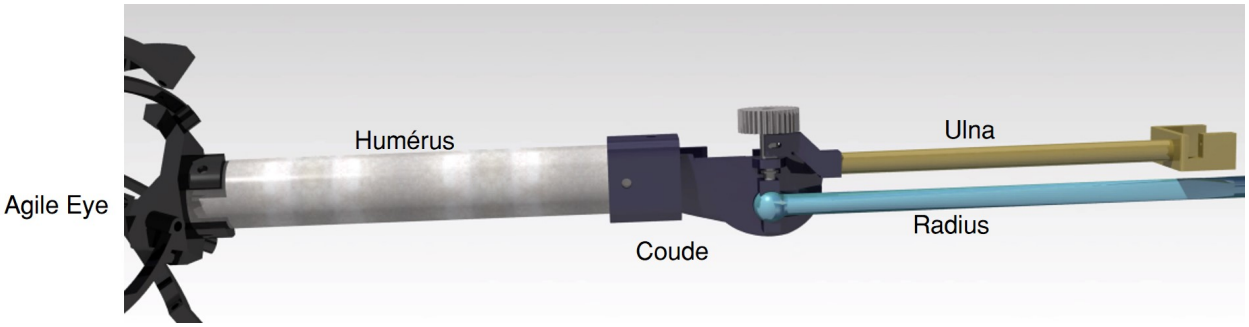

Figure 5.9 Identification des pièces du coude

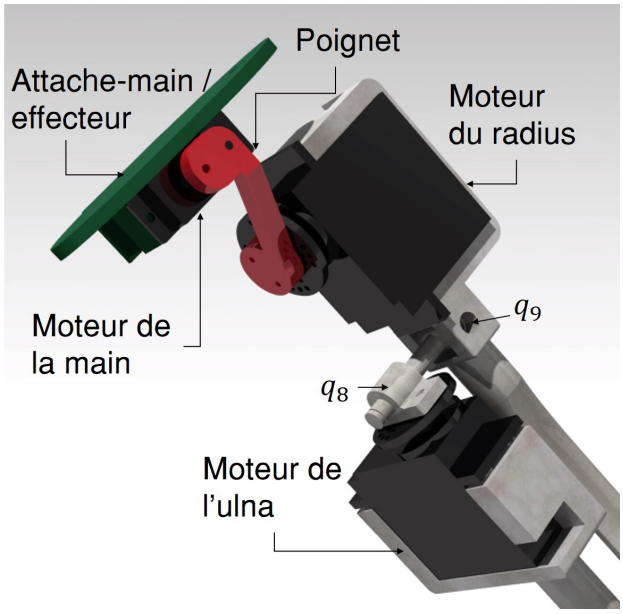

Figure 5.10 Identification des pièces du poignet

À la fin de ces étapes, le robot devrait être entièrement assemblé. Afin de le rendre fonctionnel, il ne reste plus qu'à connecter l'ensemble des moteurs sur le circuit électronique permettant son contrôle. Ce circuit très simple consiste à connecter l'alimentation des moteurs à une source de tension commune, leur mise à la terre ensemble et leur entrée de commande sur les différentes sorties d'une carte Arduino Mega. Cette carte est connectée à un ordinateur qui peut lui envoyer des consignes grâce à un port sériel. Ce circuit est illustré sur la Figure 5.11.

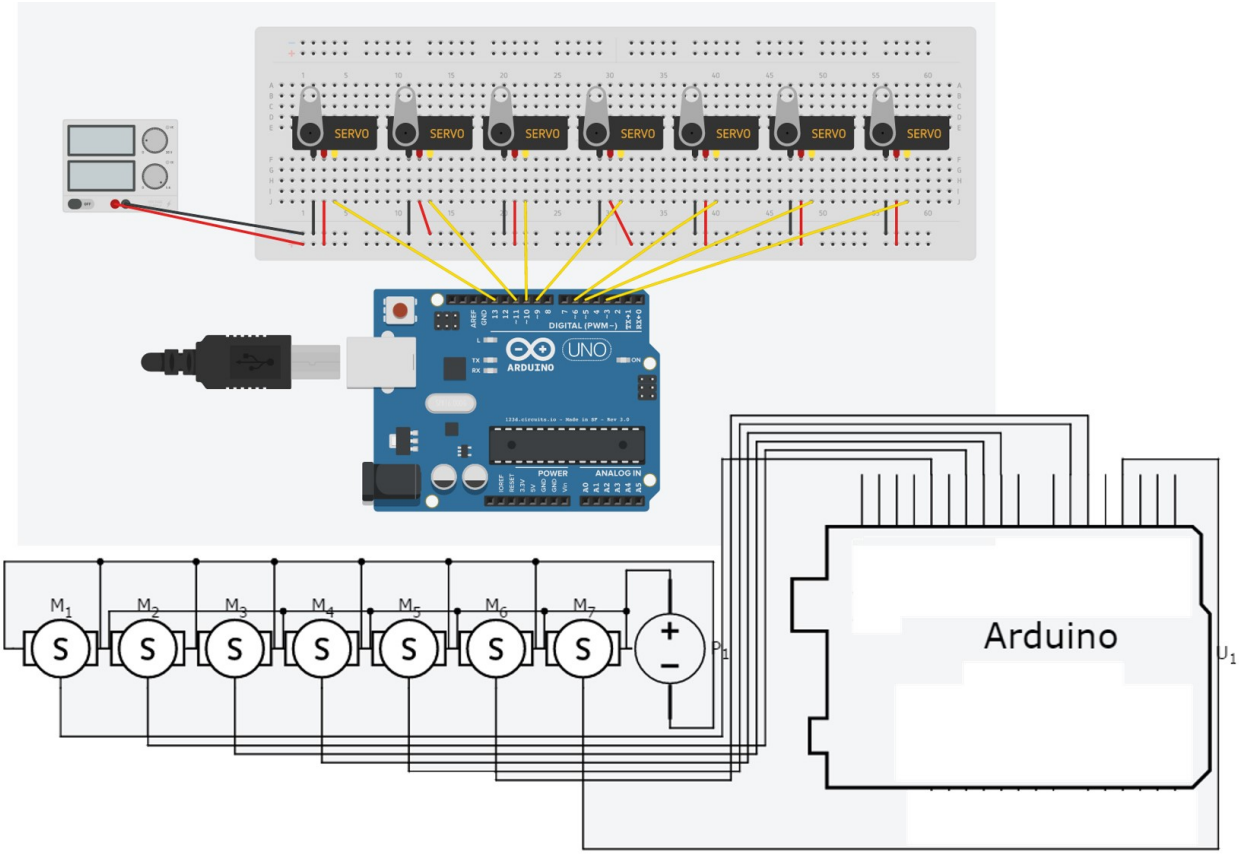

Figure 5.11 Schématisation du circuit électronique permettant l'alimentation et le contrôle du robot

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif général de ce mémoire était de développer une plateforme robotique sur laquelle pourront être développées et installées différents outils informatiques nécessaires pour un robot d'assistance anthropomorphique. Cet objectif a été atteint par la conception d'un manipulateur robotique respectant la biomécanique du bras humain et qui partage son espace de mouvement. Le présent chapitre présente un résumé de la discussion de l'article présenté au Chapitre 4. Puis, une discussion portant sur la méthodologie et les résultats complémentaires présentés au Chapitre 5 est présentée. Enfin, les limites du projet et ses implications pour des travaux futurs sont discutées.

6.1 Synthèse de l'article

Il a été montré dans l'article que le manipulateur robotique conçu lors de ce projet de recherche possède une plage de mouvement à chacun de ses joints capable de reproduire les mouvements permis par les joints du bras humain lorsque l'épaule demeure dans un cône de 120° d'ouverture centré à sa position de repos. Pour ce faire, le modèle biomécanique le plus précis de la littérature a été examiné et ses principales caractéristiques, notamment la forme de sa chaîne cinématique, ont été converties en mécanismes à intégrer dans chacune des articulations du robot. Le mécanisme possède 7 DDL actionnées et un DDL, le *carrying-angle*, libre, et est composé d'une épaule faite d'un MPS à 3 DDL en rotation pure, un coude permettant la FE, une boucle cinématique permettant la reproduction précise du mouvement de PS ainsi que d'un poignet à 2 DDL en série permettant la FE et l'adduction/abduction de la main. Il s'agit du premier manipulateur robotique anthropomorphique incorporant la structure à deux os de l'avant-bras. Il a été montré que l'usage d'un modèle biomécanique précis améliore la reconstruction du mouvement humain [97], il est donc naturel d'envisager que ce manipulateur produira la meilleure imitation du mouvement humain par un robot, mais ce résultat n'a pas été vérifié par l'étude. L'analyse cinématique et dynamique du mécanisme a permis de produire une simulation de suivi de trajectoire à l'aide d'un contrôleur PD avec couple pré-calculé. Cette simulation a pu montrer l'efficacité du contrôleur pour effectuer le suivi de trajectoire avec une précision supérieure à 99% lorsque le mécanisme est loin de ses singularités. Il a aussi été montré que l'approche de ces singularités modifie de façon indésirable la trajectoire de l'effecteur, mais que cette erreur peut être compensée par le contrôleur une fois la singularité à nouveau éloignée. La simulation a également permis de déterminer la force nécessaire pour les actionneurs du prototype physique, indiquant qu'ils

doivent respectivement être capables de générer un couple maximal de 1 Nm à l'épaule et de 0.1 Nm aux autres articulations. Enfin, le manipulateur a été fabriqué par impression 3D et son assemblage a révélé le fait que le joint passif au coude, appelé le *carrying-angle*, devrait être fixé pour éviter des secousses indésirables dans le mouvement généré. Le manipulateur conçu possède les dimensions d'un bras humain, ce qui rend possible son intégration à une chaise roulante dans un contexte de robotique d'assistance en réadaptation.

6.2 Discussion des résultats supplémentaires

Au Chapitre 5 ont été présentés des résultats issus de la simulation du mouvement du manipulateur robotique qui n'avait pas été présentés et analysés dans l'article du Chapitre 4. Le but de cette section est de revenir sur ces résultats pour les analyser.

6.2.1 Suivi de trajectoire en orientation

L'allure générale de la Figure 5.1 montre que le suivi de trajectoire en orientation est bien réussi puisque l'erreur de suivi semble pour la vaste majorité du temps être négligeable. Cela confirme ce qui avait été suggéré par les résultats du suivi de trajectoire en position présenté au Chapitre 4, c'est-à-dire que le contrôleur PD avec couple pré-calculé par la dynamique inverse se comporte correctement en stabilisant le système pendant sa trajectoire. Il existe cependant deux moments de déviation dans la trajectoire, à 5.5 s et à 9.23 s. Le premier cas a déjà été expliqué avec le suivi en position en mentionnant qu'il s'agit d'une position qui implique une configuration très près d'une singularité de l'épaule, ce qui fait en sorte que la trajectoire devient définie plutôt par l'inertie du mécanisme. On notera toutefois que la durée de la déviation en orientation est plus courte qu'en position. Cela s'explique par le fait que l'orientation peut être corrigée seulement avec les degrés de liberté du poignet, qui peuvent réagir plus rapidement puisqu'ils impliquent le mouvement d'une portion très limitée du bras seulement. Il existe quelques causes envisageables expliquant la différence d'amplitude des erreurs pour chacun des angles $\alpha_z, \alpha_y, \alpha_x$. La plus probable est que la distribution inégale de l'erreur est une conséquence de la direction du mouvement au moment du croisement de la singularité, ce qui aurait porté l'inertie à empirer l'orientation selon une direction particulière. Une autre cause possible serait que l'orientation selon α_z à ce point dans la trajectoire soit principalement guidée par l'axe de PS qui nécessite le mouvement de plus de corps que les mouvement de FE et d'adduction/abduction du poignet et serait par conséquent plus lent à réagir et imprécis. La seconde déviation de la trajectoire survenant à 9.23 s n'a une durée que de 0.01 s, c'est-à-dire exactement un pas de temps. Il s'agit donc vraisemblablement d'une erreur numérique dans la dynamique qui aurait retourné le mauvais

résultat pour l'accélération. Idéalement, il serait préférable que les algorithmes utilisés autant pour la cinématique la dynamique soient robustes et ne produise pas ce genre d'erreur, mais considérant le fait qu'un seul pas de temps dans toute la simulation est erronée, il semble que la probabilité d'erreur soit assez basse et que la vitesse de correction soit assez élevée pour ne pas que cela pose un problème majeur. De plus, l'erreur survient sûrement de la dynamique directe, puisqu'il est improbable pour l'orientation de varier d'une telle amplitude en un seul pas de temps. Or, il n'est pas nécessaire de calculer la dynamique directe pour effectuer le contrôle d'un vrai robot. De ce fait, ce genre d'erreur ne devrait pas se produire dans une situation hors simulation.

6.2.2 Vitesses et accélérations

Sur la Figure 5.2, on peut associer l'oscillation rapide entre 5.5 s et 5.9 s au passage près de la singularité à l'épaule, tel qu'il en a été discuté maintes fois précédemment. Il en va de même pour les oscillations présentes aux Figures 5.3-5.4 qui ont lieu sur la même plage temporelle. Les oscillations moins intenses présentes au tout début de la simulation sont causées par la mise en mouvement du robot qui doit se faire très rapidement. Cela est notamment du au contrôleur qui applique un moment plus élevé au début car l'erreur sur la vitesse est grande, ce qui cause un dépassement. Cette explication est aussi la même pour les oscillations dans la partie gauche des Figures 5.3-5.4. Enfin, la vitesse maximale de 0.34 m/s peut être considérée comme représentative d'une vitesse utilisée en robotique d'assistance, car il s'agit d'une vitesse assez élevée pour faire des mouvements simples en un temps raisonnable, mais assez faible pour demeurer sécuritaire pour l'entourage du robot et pour être facile à manœuvrer manuellement.

Les Figures 5.3 et 5.4 mettent aussi en évidence une déviation légère de la trajectoire entre 8.0 s et 8.4 s. Cette déviation est trop faible pour être remarquée dans les graphiques de position, mais l'effet d'amplification du bruit amené par l'action de dériver la rend visible pour la vitesse angulaire et l'accélération. Cette oscillation pouvait aussi être remarquée sur la Figure 8 de l'article dans le Chapitre 4. Considérant sa position dans le cycle du mouvement, c'est-à-dire symétrique au pic d'oscillations associé à la singularité par rapport au maximum d'accélération du cycle, il est probable qu'il s'agisse à nouveau des effets de la singularité, cette fois moindre car le mouvement s'en est éloigné.

6.3 Limites et perspectives

Les résultats obtenus pendant la réalisation de ce projet ont permis d'obtenir une preuve de concept attestant de la possibilité de créer un bras robotique anthropomorphique fonctionnel imitant un modèle biomécanique pour un usage en robotique d'assistance. Le robot conçu pourrait être utilisé comme plateforme de développement de logiciels afin de faire des tests et de la recherche, cependant il reste beaucoup à faire avant que le bras robotique proposé dans ce mémoire ne puisse être vendu commercialement et rendu accessible aux patients en réadaptation. Le but de cette section est de décrire les limitations au niveau du design, de la modélisation et du contrôle et de décrire les travaux futurs à accomplir dans les prochaines itérations du projet pour les circonvenir, ainsi que de discuter des perspectives d'avenir liées à la commercialisation future d'un tel produit comme robot d'assistance.

6.3.1 Design

Le design du robot a été entièrement fait avec pour premier et seul objectif d'imiter la chaîne cinématique du modèle biomécanique présenté en [97] développé par notre groupe de recherche. Par conséquent, certaines considérations pratiques ont été négligées afin de conduire plus rapidement à un prototype physique fonctionnel et valider les capacités de la chaîne cinématique produite. Certaines améliorations au design devraient donc être effectuées pour les prochaines itérations du projet en fonction des observations faites lors de la validation, mais aussi pour corriger les aspects pratiques négligés qui se révèlent problématiques.

Tel qu'indiqué dans l'article au Chapitre 4, la validation du modèle a mis en évidence que le fait de laisser le joint passif guidant le *carrying-angle* de l'avant-bras conduit à des trajectoires saccadées et qu'il serait nécessaire de le fixer en retirant l'axe de rotation. La revue de littérature faite au Chapitre 2 a aussi indiqué que de fixer la valeur de cet angle conduit à un modèle biomécanique d'une précision satisfaisante pour plusieurs études. En prenant en considération que le but du projet consiste globalement à imiter le mouvement humain et non à le calculer, il paraît donc acceptable de fixer la valeur du *carrying-angle* sur le robot. En prenant des mesures de capture de mouvement, [125] montre que la valeur de cet angle varie en fonction du mouvement du bras, autant pendant la FE du coude que pendant la PS. La valeur fixée de l'angle devra donc être choisie en fonction de l'application exacte pour laquelle sera utilisé le robot, en prenant la valeur de l'angle pendant le mouvement le plus commun à faire dans la tâche à effectuer. Cette solution paraît largement plus appropriée que l'alternative qui consiste à ajouter un actionneur pour contrôler ce joint. En effet, cela nécessiterait l'ajout d'un moteur vraisemblablement au niveau du coude, ce qui augmente davantage l'inertie à

déplacer par l'épaule. De plus, cela augmenterait également considérablement la complexité du mécanisme ou, à l'inverse, fixer l'angle permettrait de le simplifier. Le passage entre 7 et 8 DDL modifie la complexité de la cinématique inverse et de la dynamique, ce qui influence le temps d'exécution pour les calculs liés à la planification du mouvement. Le contrôleur à concevoir contient une variable de sortie de plus ou de moins, ce qui change également la taille des matrices de gain du contrôleur et donc la difficulté de les obtenir. Bref, lors de l'usage du bras robotique pour l'accomplissement de tâches répétitives, il sera plus approprié et nécessaire de choisir la valeur à laquelle fixer le *carrying-angle*.

D'après la revue de littérature du Chapitre 2, le choix d'utiliser l'agile eye comme mécanisme à l'épaule est apparu naturel pour profiter de sa symétrie, de son large espace de travail, de la localisation de ses singularités, mais aussi plus généralement, de la large gamme d'études faite à son sujet. Les robots d'assistance pouvant trouver usage dans des contextes variés, et non uniquement en réadaptation, ces propriétés ont paru essentielles pour couvrir la plus large gamme possible de mouvement. Cependant, il est apparu en comparant l'espace de travail de l'agile eye à la plage d'angles que peut couvrir l'épaule qu'il n'est pas possible de reproduire l'entièreté de l'espace de travail du bras humain. Bien sûr, il a déjà été mentionné que des mécanismes sériels n'étaient pas appropriés pour produire une épaule étant donné la difficulté de produire un mécanisme avec un seul point de rotation pour toute configuration et que cela rendrait impossible la distribution de l'effort sur les différents effecteurs. Il a aussi été dit que l'agile eye a été optimisé géométriquement pour maximiser le volume de son espace de travail, alors il paraît donc impossible de reproduire l'entièreté du mouvement de l'épaule humaine. Cependant, il serait possible qu'un contexte d'utilisation particulier du bras ne nécessite pas une épaule avec un espace de travail symétrique et qui pourrait bénéficier de ne pas limiter les mouvements à ceux dont l'épaule est près de sa position au repos, par exemple si on voulait intégrer le bras sur un humanoïde robotique. Dans ce cas, le mécanisme de l'agile eye pourrait être substitué par celui d'un autre MPS comme celui présenté dans [31]. D'autres mécanismes pourraient aussi avoir un meilleur rapport de transmission, c'est-à-dire une plus grande proportion de l'effort appliqué aux moteurs qui est transmis à l'effecteur, ce qui permettrait d'utiliser des actionneurs de plus petite taille et moins chers.

Parmi les points nécessaires à obtenir un produit commercialisable qui ont été négligés pour permettre une validation plus rapide de la chaîne cinématique, il y a notamment le coût et l'inertie du robot. Ces deux variables ont été principalement minimisées dans le cadre de ce projet par le fait que le prototype a été produit par impression 3D. Le plastique en acide polyacitique (PLA) utilisé pour l'impression 3D est effectivement peu coûteux comme matière première. La méthode de prototypage elle-même n'encourt également que peu de coûts de production supplémentaires liés à l'entretien. De plus, le PLA est léger et le fait

d'utiliser l'impression 3D rend possible, même facile, la production de pièces partiellement creuses pour qu'elles soient plus légères ; cette possibilité n'a cependant pas été saisie pour plutôt maximiser la solidité des pièces, tel qu'indiqué au Chapitre 5. Toutefois, ce qui pourrait être fait pour une itération future du robot afin de diminuer davantage les coûts et la masse du produit serait de repenser la forme des pièces du robot avec ces critères en tête. Le choix des actionneurs pourra aussi être révisé en fonction de ces deux critères, cependant la diminution de la masse d'un actionneur engendre généralement une augmentation de son coût. Il s'ensuit donc qu'un compromis devra être fait afin de faire le choix optimal. Les actionneurs actuellement utilisés ont été choisis car ils étaient les moins chers parmi ceux qui respectaient la contrainte de moment à fournir, mais leur masse n'a pas été prise en compte dans le choix.

Enfin, pour obtenir un produit potentiellement commercialisable, des modifications esthétiques ou pratiques au design seront requises. Pour une utilisation par des patients ou des cliniciens, par opposition à une utilisation par des chercheurs, il est primordial que le mécanisme soit solide et nécessite le minimum d'entretien et il est généralement apprécié, quoique pas obligatoire, qu'il soit esthétiquement plaisant. Pour ce faire, certaines étapes de complétion du design sont proposées dans le Tableau 6.1 et sont expliquées dans le détail dans l'Annexe C.

Tableau 6.1 Améliorations suggérées pour un produit fini

Étape	Amélioration
1	Intégrer de l'espace pour les pièces/fils électroniques dans le design
2	Remplacer les pièces imprimées par des produits achetés lorsque possible
3	Diminuer la taille des actionneurs
4	Protéger le mécanisme avec une enveloppe protectrice
5	Remplacer la structure en PLA par un matériau plus solide et léger

6.3.2 Modélisation

Dans le cadre de ce projet, la modélisation cinématique et dynamique a été faite dans le but de produire une simulation qui a permis de calculer le moment maximal à fournir par les actionneurs lors d'un suivi de trajectoire. Comme on ne désirait obtenir qu'un ordre de grandeur, plusieurs approximations ont été faites et qui devraient être revues pour obtenir des résultats plus précis. Premièrement, le modèle utilisé pour les calculs de cinématique et dynamique a considéré le poignet comme sphérique et sans dimension. Pour compenser cette approximation, l'inertie et les dimensions des pièces négligées ont été ajoutées à celle

de l'effecteur. Ce calcul avait pour avantage de correspondre directement au modèle biomécanique étudié, et était considéré comme une approximation acceptable étant donné la petite taille du poignet par rapport au reste du bras, mais pour obtenir des valeurs exactes lors de la cinématique et de la dynamique, il serait nécessaire de compléter le modèle en prenant les différentes pièces faisant partie du poignet en considération. Deuxièmement, l'intégrateur d'ordre zéro utilisé pour la dynamique directe de l'épaule est une approximation très grossière qui pourrait être remplacée par une approximation numérique plus précise d'ordre supérieur. Troisièmement, le modèle dynamique ne prend pas en considération le frottement dans les joints passifs. Celui-ci deviendrait sans doute négligeable en toutes circonstances avec l'ajout de roulements à bille dans le design, mais demeure pour l'instant une force existante qui n'est pas considérée dans le calcul de la dynamique. Quatrièmement, les actionneurs ont été modélisés comme des sources de moments de force idéales, c'est-à-dire que leur temps de réponse est instantané. Étant donné les valeurs relativement grandes (~ 0.5 Nm) de moment appliquées pendant le mouvement, on peut s'attendre à ce qu'un actionneur réel possède un temps de monté non négligeable qui ralentirait le système.

De plus, chacune des modifications au design suggérées à la section précédente implique qu'il faut ajuster toutes les valeurs d'inertie utilisées dans les calculs de la dynamique. Il en va de même pour les valeurs géométriques utilisées dans la dynamique si jamais les dimensions des pièces sont changées. Ces nouvelles valeurs d'inertie pourront alors être utilisées dans la simulation pour calculer à nouveau la contrainte de capacité à respecter pour les actionneurs qui pourront alors être à nouveau choisi en conséquence. Ce processus devra être fait entre chacune des modifications au design.

6.3.3 Contrôle

Tel que discuté dans l'article au Chapitre 4, le choix d'un algorithme de contrôle par couple pré-calculé a été fait parce qu'il est facile d'implémentation en simulation et parce que les moments obtenus par la dynamique inverse étaient de toutes façons une mesure désirée pour pouvoir dimensionner les moteurs. Bien que le couple pré-calculé soit une stratégie commune pour le contrôle de systèmes non-linéaires multivariables [126], [127] car il peut être implémenté de façon quasi-systématique lorsque la dynamique d'un système est connue [128], il ne s'agit pas nécessairement du meilleur choix possible d'algorithme de contrôle. En effet, ce type de contrôleur est sensible aux erreurs de modélisation, mais en plus il est généralement plus difficile de contrôler le moment produit par un moteur que sa position ou sa vitesse. On pourrait plutôt envisager un contrôle en position, par une approche de configuration [129], ou bien un contrôle en vitesse par une approche utilisant la matrice jacobienne [130]. Le choix

précis du contrôleur dépendra de l'application sur laquelle on travaille. Par exemple, pour une application ne nécessitant qu'un petit espace de travail, un contrôleur peut être conçu sur la dynamique linéarisée autour de cet espace, tandis que des contrôleurs plus élaborés conçus par exemple par *backstepping* pourront être utilisés pour le cas où le système doit être modélisé de façon non-linéaire.

Même dans le cas où le contrôle par couple pré-calculé serait conservé, quelques fonctionnalités devraient être ajoutées au contrôleur PD proposé dans ce mémoire pour une utilisation sur un robot physique. D'une part, il faudrait inclure un saturateur afin de s'assurer de ne pas envoyer aux actionneurs une entrée trop élevée pour leurs capacités, ce qui risquerait d'abîmer le matériel. D'autre part, il serait souhaitable d'inclure une contribution de l'erreur de positionnement de l'effecteur, en incluant un observateur dans le design du contrôleur, plutôt que de se baser uniquement sur la position des joints dans le calcul de la sortie du contrôleur. Dans un contexte de robotique d'assistance, il faudrait également inclure une forme d'arrêt d'urgence par retour haptique afin d'éviter des collisions à force élevée qui pourraient causer des bris ou des blessures.

Enfin, peu importe le contrôleur implémenté, il faudra vérifier que celui-ci peut bien rejeter les perturbations et est acceptablement robuste aux retards, au bruit des mesures et aux erreurs de modélisation comme les jeux mécaniques.

6.3.4 Trajectoire

Le bras robotique conçu dans le cadre de ce mémoire possède la capacité d'imiter les mouvements du bras humain dans un espace de travail avec l'épaule près du repos. Cependant, même à l'intérieur de cet espace, le bras ne se comportera pas nécessairement avec une trajectoire naturelle pendant ses mouvements. Ainsi, pour profiter au maximum de l'aspect biofidèle du robot, il sera nécessaire de se pencher sur le développement d'algorithmes de génération de trajectoires biomimétiques. La plupart des algorithmes de planification de trajectoire sont fait par optimisation à l'aide de méthodes de calcul variationnel [131] pour trouver une trajectoire qui minimise un critère donné. À la conférence International Multibody System Dynamics (IMSD) 2016, les travaux de Patko et al. [132] ont été présentés concernant la recherche du critère d'optimisation permettant la reproduction du mouvement humain. Cette recherche modélisait le bras humain à l'aide du modèle de Laitenberger et consistait à comparer différents critères régulièrement utilisés, comme la maximisation de la dextérité, la minimisation de l'énergie ou la minimisation du déplacement, relativement à leur capacité à reproduire une trajectoire en 2D produite par capture de mouvement et modélisée par le modèle biomécanique. Ces résultats ont montré que, dans ces conditions, la maximisation de la dextérité

était le critère le plus précis, mais il serait intéressant de poursuivre ces expérimentations pour confirmer le résultat pour des trajectoires en 3D et potentiellement étudier la possibilité de construire une fonction de coût à minimiser sur mesure pour le problème plutôt que d'utiliser seulement les stratégies déjà existantes. L'accès à un robot biomimétique comme celui conçu pendant ce projet permettra d'implémenter les algorithmes ainsi développés et de valider visuellement et qualitativement leurs résultats.

6.3.5 Interface homme-machine

Afin de rendre le bras robotique présenté dans ce mémoire commercialisable, et utilisable dans un contexte de robotique d'assistance, il sera nécessaire de lui intégrer une interface de contrôle. Tel que mentionné dans la revue de littérature au Chapitre 2, les robots d'assistances sont généralement contrôlés à l'aide de manettes, souvent de type *joystick*. La modalité de contrôle doit toujours être adaptée aux capacités de l'utilisateur, c'est pourquoi des alternatives au contrôle sont développées. Ces différentes modalités facilitent le contrôle du robot en permettant l'automatisation partielle ou complète du mouvement. Parmi celles-ci, on peut inclure le suivi du regard [133], la vision/stéréovision par ordinateur [134] et la réalité augmentée [135]. Le robot développé dans ce projet pourra servir de plateforme de test pour le développement de fonctionnalités pour l'application de ces modalités en robotique d'assistance.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce mémoire avait pour but de concevoir un bras robotique anthropomorphique possédant une architecture biofidèle, c'est-à-dire imitant la chaîne cinématique du membre supérieur humain. Un design a été créé en intégrant les caractéristiques d'un modèle biomécanique du membre supérieur au sein des mécanismes de l'épaule, du coude, de l'avant-bras et du poignet du robot. Les modélisations cinématique et dynamique ont été réalisées en combinant des algorithmes d'optimisation et des résultats analytiques de la littérature aux capacités du logiciel de modélisation Robotran. Un contrôleur par couple pré-calculé a été conçu à partir des résultats de la dynamique inverse et a été utilisé dans une simulation du mouvement en suivi de trajectoire afin de dimensionner les moteurs à utiliser sur un prototype physique. Les résultats de simulation ont également mis en évidence l'impact du passage de la trajectoire près d'une singularité, qui crée une déviation du mouvement rapidement corrigée par le contrôleur. Le prototype a été construit par prototypage rapide et sa caractérisation a révélé que les joints du bras robotique peuvent posséder la même amplitude de mouvement que les joints d'un bras humain, à l'exception de l'épaule. À l'épaule, le mécanisme choisi - l'agile eye -, est un mécanisme parallèle qui maximise l'espace de travail du joint mais demeure tout de même limité à un espace de travail cônique plus petit que celui du bras humain. Il s'ensuit donc que les mouvements humains qui pourront être imités par le robot devront être ceux pour lequel l'épaule est près de sa position au repos. La construction du prototype a également mis en évidence la nécessité de fixer le *carrying-angle* décrivant la déviation de l'avant-bras par rapport à l'humérus pour éviter des trajectoires saccadées.

Le bras robotique développé est le premier bras robotique de la littérature avec une architecture biofidèle incorporant l'intégration de la boucle cinématique de pronation-supination de l'avant-bras. Il pourrait servir en recherche comme plateforme de test adéquate au développement d'algorithmes liés à la trajectoire des mouvements humains en permettant la validation visuelle de leurs résultats. Dans le cadre du projet à long terme de développement d'un bras de réadaptation dont les travaux présentés dans ce mémoire font partie, les résultats de la présente étude représentent les bases sur lesquelles construire les futurs projets de recherche et développement relatifs aux modalités de contrôle, à la génération de trajectoire et au design de contrôleur pour un robot biomimétique. La forme anthropomorphique du bras devrait bénéficier les usagers en réadaptation qui y trouveront un mouvement plus naturel et familier, qui est ainsi plus facile à prévoir. Une partie de ces travaux pourrait également se révéler utile pour le développement d'une prothèse robotique biomimétique, pour laquelle l'intérêt de paraître humain est un avantage facilitant non seulement l'utilisation, mais aussi

l'esthétique de façon très importante. À l'extérieur du contexte de la réadaptation, l'usage d'un bras robotique comme celui développé dans ce mémoire peut aussi avoir des applications industrielles. La forme anthropomorphique du robot rend plus facile son intégration dans un milieu de travail partagé avec des travailleurs et simplifie l'interaction avec celui-ci en le rendant à la fois plus intuitif dans son mouvement et en apparence plus sociale.

RÉFÉRENCES

[1] A. E. Emery, *Muscular dystrophy : The facts*. Oxford University Press, USA, 2000.

[2] C. Tator, G. Bray et D. Morin, "The CBANCH Report-The Burden of Neurological Diseases, Disorders, and Injuries in Canada", *Canadian journal of neurological sciences*, t. 34, n° 3, p. 268–269, 2007.

[3] B. Atchison et D. K. Dirette, *Conditions in occupational therapy : effect on occupational performance*. Lippincott Williams & Wilkins, 2007.

[4] C. Lepage, L. Noreau et B. Paul-Marie, "Association between characteristics of locomotion and accomplishment of life habits in children with cerebral palsy", *Physical therapy*, t. 78, n° 5, p. 458, 1998.

[5] M. Mokhtari, M. A. Feki, B. Abdulrazak et B. Grandjean, "3 toward a human-friendly user interface to control an assistive robot in the context of smart homes", in *Advances in Rehabilitation Robotics*, Springer, 2004, p. 47–56.

[6] A. Campeau-Lecours, V. Maheu, S. Lepage, H. Lamontagne, S. Latour, L. Paquet et N. Hardie, "JACO Assistive Robotic Device : Empowering People With Disabilities Through Innovative Algorithms",

[7] F. Routhier, P. Archambault, M.-C. Cyr, V. Maheu, M. Lemay et I. Gélinas, "BENEFITS OF JACO ROBOTIC ARM ON INDEPENDENT LIVING AND SOCIAL PARTICIPATION : AN EXPLORATORY STUDY",

[8] V. Maheu, P. S. Archambault, J. Frappier et F. Routhier, "Evaluation of the JACO robotic arm : Clinico-economic study for powered wheelchair users with upper-extremity disabilities", in *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on*, IEEE, 2011, p. 1–5.

[9] M. Sitti, A. Menciassi, A. J. Ijspeert, K. H. Low et S. Kim, "Survey and introduction to the focused section on bio-inspired mechatronics", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, t. 18, n° 2, p. 409–418, 2013.

[10] J.-A. Meyer et A. Guillot, "Biologically inspired robots", in *Springer Handbook of Robotics*, Springer, 2008, p. 1395–1422.

[11] B. R. Duffy, "Anthropomorphism and the social robot", *Robotics and autonomous systems*, t. 42, n° 3, p. 177–190, 2003.

[12] J. Koenemann, F. Burget et M. Bennewitz, "Real-time imitation of human whole-body motions by humanoids", in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, IEEE, p. 2806–2812.

[13] S. Stadler, A. Weiss, N. Mirnig et M. Tscheligi, "Anthropomorphism in the factory : a paradigm change ?", in *Proceedings of the 8th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, IEEE Press, 2013, p. 231–232.

[14] M. M. De Graaf, S. B. Allouch et T. Klamer, "Sharing a life with Harvey : Exploring the acceptance of and relationship-building with a social robot", *Computers in human behavior*, t. 43, p. 1–14, 2015.

[15] P. Dario, E. Guglielmelli, C. Laschi et G. Teti, "MOVAID : a personal robot in everyday life of disabled and elderly people", *Technology and Disability*, t. 10, n° 2, p. 77–93, 1999.

[16] S. K. Mustafa, G. Yang, S. H. Yeo, W. Lin et I.-M. Chen, "Self-calibration of a biologically inspired 7 DOF cable-driven robotic arm", *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, t. 13, n° 1, p. 66–75, 2008.

[17] S. Kagami, K. Nishiwaki, J. J. Kuffner Jr, T. Sugihara, M. Inaba et I. Hirochika, "Design, implementation, and remote operation of the humanoid H6", in *Experimental Robotics VII*, Springer, 2001, p. 41–50.

[18] K. Kaneko, K. Harada, F. Kanehiro, G. Miyamori et K. Akachi, "Humanoid robot HRP-3", in *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, p. 2471–2478.

[19] S. Rader, L. Kaul, H. Fischbach, N. Vahrenkamp et T. Asfour, "Design of a high-performance humanoid dual arm system with inner shoulder joints", in *Humanoid Robots (Humanoids), 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on*, IEEE, p. 523–529.

[20] B. Driessen, H. Evers et J. v Woerden, "MANUS—a wheelchair-mounted rehabilitation robot", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H : Journal of Engineering in Medicine*, t. 215, n° 3, p. 285–290, 2001.

[21] B. Siciliano et O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, sér. Springer Handbooks. Springer International Publishing, 2016, isbn : 9783319325521. adresse : `https://books.google.ca/books?id=RTvADAAAQBAJ`.

[22] L. Marchal-Crespo et D. J. Reinkensmeyer, "Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury", *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, t. 6, n° 1, p. 20, 2009.

[23] K. Picone, *Conception d'un outil de mesure standardisé pour le bras robotique jaco et évaluation préliminaire chez des adultes sans difficultés motrices*, Rapport de stage présenté à Martin Lemay, 2014.

[24] H. Sainte-Justine et M. Vanasse, *Les maladies neuromusculaires chez l'enfant et l'adolescent*. Montréal : Éditions de l'Hôpital Sainte-Justine, 2004.

[25] M. Busnel, R. Cammoun, F. Coulon-Lauture, J.-M. Détriché et al., "The robotized workstation" MASTER" for users with tetraplegia : Description and evaluation", *Journal of rehabilitation research and development*, t. 36, nº 3, p. 217, 1999.

[26] J. Hofschulte, M. Seebode et W. Gerth, "Parallel manipulator hip joint for a bipedal robot", in *Climbing and Walking Robots*, Springer, 2005, p. 601–609.

[27] D. Shapiro, "Development of a Biofidelic Artificial Arm for a Martial Arts Dummy", mém.de mast., University of Washington, 2011.

[28] M. Controzzi, C. Cipriani, B. Jehenne, M. Donati et M. C. Carrozza, "Bio-inspired mechanical design of a tendon-driven dexterous prosthetic hand", in *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, IEEE, p. 499–502.

[29] Y. Sodeyama, I. Mizuuchi, T. Yoshikai, Y. Nakanishi et M. Inaba, "A shoulder structure of muscle-driven humanoid with shoulder blades", in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, p. 4028–4033.

[30] D. A. R. P. AGENCY, *DARPA Robotics Challenge (DRC)*, Page consultée le 3 mars 2017, 2015. adresse : `http://www.darpa.mil/program/darpa-robotics-challenge`.

[31] Z. J. Liang Zhang et S. Li, "Dynamic modeling and Analysis of a Novel 3-RRR Parallel Shoulder", *Journal of SoftwareEngineering*, t. 9, nº 4, p. 773–784, 2015.

[32] S. H. Collins, M. Wisse et A. Ruina, "A three-dimensional passive-dynamic walking robot with two legs and knees", *The International Journal of Robotics Research*, t. 20, nº 7, p. 607–615, 2001.

[33] H. Hirukawa, F. Kanehiro, K. Kaneko, S. Kajita, K. Fujiwara, Y. Kawai, F. Tomita, S. Hirai, K. Tanie, T. Isozumi et al., "Humanoid robotics platforms developed in HRP", *Robotics and Autonomous Systems*, t. 48, nº 4, p. 165–175, 2004.

[34] K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, K. Miura, S. Nakaoka et S. Kajita, "Cybernetic human HRP-4C", in *Humanoid Robots, 2009. Humanoids 2009. 9th IEEE-RAS International Conference on*, IEEE, p. 7–14.

[35] T. Asfour, K. Regenstein, P. Azad, J. Schroder, A. Bierbaum, N. Vahrenkamp et R. Dillmann, "ARMAR-III : An integrated humanoid platform for sensory-motor control", in *Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on*, IEEE, p. 169–175.

[36] T. Asfour, J. Schill, H. Peters, C. Klas, J. Bücker, C. Sander, S. Schulz, A. Kargov, T. Werner et V. Bartenbach, "Armar-4 : A 63 dof torque controlled humanoid robot", in *Humanoid Robots (Humanoids), 2013 13th IEEE-RAS International Conference on*, IEEE, p. 390–396.

[37] B. Dynamics, *Atlas Anthropomorphic Robot*, Page consultée le 3 mars 2017, 2013. adresse : `http://www.bostondynamics.com/robot_Atlas.html`.

[38] M. Bagheri, A. Ajoudani, J. Lee, D. G. Caldwell et N. G. Tsagarakis, "Kinematic analysis and design considerations for optimal base frame arrangement of humanoid shoulders", in *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*, IEEE, p. 2710–2715.

[39] *EU project Whole body Adaptive Locomotion and Manipulatioin (Walkman)*, Page consultée le 3 mars 2017. adresse : `http://walk-man.eu/`.

[40] P. F. Jean-Claude Samin, *Multibody dynamics : Computational methods and applications*. Springer Science & Business Media, 2013, t. 28.

[41] R. S. Hartenberg et J. Denavit, "A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices", *Journal of applied mechanics*, t. 77, n° 2, p. 215–221, 1955.

[42] C. Rocha, C. Tonetto et A. Dias, "A comparison between the Denavit–Hartenberg and the screw-based methods used in kinematic modeling of robot manipulators", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, t. 27, n° 4, p. 723–728, 2011.

[43] L. Sciavicco et B. Siciliano, *Modeling and control of robot manipulators*, 0. McGraw-Hill New York, 1996, t. 8.

[44] *Industrial Robots | KUKA AG*, Page consultée le 4mars 2017. adresse : `https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/industrial-robots`.

[45] *Industrial Robots for smarter automation*, Page consultée le 4mars 2017. adresse : `http://www.fanuc.eu/se/en/robots/`.

[46] S. Nof, *Handbook of Industrial Robotics*, sér. Electrical and electronic engineering vol. 1. Wiley, 1999, isbn : 9780471177838. adresse : `https://books.google.ca/books?id=7od4alFKfNMC`.

[47] J.-P. Merlet et C. Gosselin, "Parallel mechanisms and robots", in *Springer Handbook of Robotics*, Springer, 2008, p. 269–285.

[48] T. Senoo, Y. Yamakawa, S. Mizusawa, A. Namiki, M. Ishikawa et M. Shimojo, "Skillful manipulation based on high-speed sensory-motor fusion", in *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*, IEEE, p. 1611–1612.

[49] J.-P. Merlet, "Direct kinematics of parallel manipulators", *IEEE transactions on robotics and automation*, t. 9, n° 6, p. 842–846, 1993.

[50] H. Zhuang, J. Yan et O. Masory, "Calibration of Stewart platforms and other parallel manipulators by minimizing inverse kinematic residuals", *Journal of Field Robotics*, t. 15, n° 7, p. 395–405, 1998.

[51] W. Khalil et O. Ibrahim, "General solution for the dynamic modeling of parallel robots", *Journal of intelligent and robotic systems*, t. 49, n° 1, p. 19–37, 2007.

[52] M. Sklar et D. Tesar, "Dynamic analysis of hybrid serial manipulator systems containing parallel modules", *Journal of mechanisms, transmissions, and automation in design*, t. 110, n° 2, p. 109–115, 1988.

[53] B. W. Mooring, Z. S. Roth et M. R. Driels, *Fundamentals of manipulator calibration*. Wiley New York, 1991.

[54] F. Pierrot, C. Reynaud et A. Fournier, "DELTA : a simple and efficient parallel robot", *Robotica*, t. 8, n° 02, p. 105–109, 1990.

[55] M. Laribi, L. Romdhane et S. Zeghloul, *Advanced synthesis of the DELTA parallel robot for a specified workspace*. INTECH Open Access Publisher, 2008.

[56] R. L. W. II, "The Delta Parallel Robot : Kinematics Solution", thèse de doct., Ohio University, 2015.

[57] J. K. Salisbury et J. J. Craig, "Articulated hands : Force control and kinematic issues", *The International journal of Robotics research*, t. 1, n° 1, p. 4–17, 1982.

[58] M. Stock et K. Miller, "Optimal kinematic design of spatial parallel manipulators : application to linear delta robot", *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF MECHANICAL DESIGN*, t. 125, n° 2, p. 292–301, 2003.

[59] Y. Patel, P. George et al., "Parallel manipulators applications-a survey", *Modern Mechanical Engineering*, t. 2, n° 03, p. 57, 2012.

[60] I. A. Bonev et C. M. Gosselin, “Analytical determination of the workspace of symmetrical spherical parallel mechanisms”, *IEEE Transactions on Robotics*, t. 22, n° 5, p. 1011–1017, 2006.

[61] S. Staicu, “Dynamics of a 3-RRR Spherical Parallel Mechanism Based on Principle of Virtual Powers”, 12th IFToMM World Congress, 2007.

[62] C. Gosselin et J. Angeles, “The optimum kinematic design of a spherical three-degree-of-freedom parallel manipulator”, *Journal of mechanisms, transmissions, and automation in design*, t. 111, n° 2, p. 202–207, 1989.

[63] C. M. Gosselin et J.-F. Hamel, “The agile eye : a high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device”, in *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*, IEEE, p. 781–786.

[64] I. A. Bonev, D. Chablat et P. Wenger, “Working and assembly modes of the Agile Eye”, in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, IEEE, p. 2317–2322.

[65] C. M. Gosselin, E. S. Pierre et M. Gagne, “On the development of the agile eye”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, t. 3, n° 4, p. 29–37, 1996.

[66] C. Gosselin et M. Gagné, “A closed-form solution for the direct kinematics of a special class of spherical three-degree-of-freedom parallel manipulators”, in *Computational Kinematics 95*, Springer, 1995, p. 231–240.

[67] X. Kong et C. M. Gosselin, “A formula that produces a unique solution to the forward displacement analysis of a quadratic spherical parallel manipulator : The Agile Eye”, *Journal of Mechanisms and Robotics*, t. 2, n° 4, p. 044 501, 2010.

[68] C. Gosselin et M. Gagne, “Dynamic models for spherical parallel manipulators”, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, Milan, Italy*, 1995.

[69] C. M. Gosselin et É. St-Pierre, “Development and experimentation of a fast 3-DOF camera-orienting device”, *The International Journal of Robotics Research*, t. 16, n° 5, p. 619–630, 1997.

[70] K. Al-Widyan, X. Q. Ma et J. Angeles, “The robust design of parallel spherical robots”, *Mechanism and Machine Theory*, t. 46, n° 3, p. 335–343, 2011.

[71] D. Stewart, “A platform with six degrees of freedom”, *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, t. 180, n° 1, p. 371–386, 1965.

[72] H. Li, C. M. Gosselin, M. J. Richard et B. M. St-Onge, "Analytic form of the six-dimensional singularity locus of the general Gough-Stewart platform", *Journal of Mechanical Design*, t. 128, n° 1, p. 279–287, 2006.

[73] M.-J. Liu, C.-X. Li et C.-N. Li, "Dynamics analysis of the Gough-Stewart platform manipulator", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, t. 16, n° 1, p. 94–98, 2000.

[74] Y. Ting, Y.-S. Chen et H.-C. Jar, "Modeling and control for a Gough-Stewart platform CNC machine", *Journal of Field Robotics*, t. 21, n° 11, p. 609–623, 2004.

[75] Y. Cheng, G. Ren et S. Dai, "The multi-body system modelling of the Gough–Stewart platform for vibration control", *Journal of Sound and Vibration*, t. 271, n° 3, p. 599–614, 2004.

[76] L. Yingjie, Z. Wenbai et R. Gexue, "Feedback control of a cable-driven Gough-Stewart platform", *IEEE Transactions on Robotics*, t. 22, n° 1, p. 198–202, 2006.

[77] B. Siciliano, "Kinematic control of redundant robot manipulators : A tutorial", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, t. 3, n° 3, p. 201–212, 1990.

[78] A. A. Maciejewski et C. A. Klein, "Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environments", *The international journal of robotics research*, t. 4, n° 3, p. 109–117, 1985.

[79] A. R. Hirakawa et A. Kawamura, "Trajectory planning of redundant manipulators for minimum energy consumption without matrix inversion", in *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, IEEE, t. 3, p. 2415–2420.

[80] J. Hollerbach et K. Suh, "Redundancy resolution of manipulators through torque optimization", *IEEE Journal on Robotics and Automation*, t. 3, n° 4, p. 308–316, 1987.

[81] R. Mayorga et A. Wong, "A singularities prevention approach for redundant robot manipulators", in *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*, IEEE, p. 812–817.

[82] D. N. Nenchev, "Redundancy resolution through local optimization : A review", *Journal of robotic systems*, t. 6, n° 6, p. 769–798, 1989.

[83] S. McGhee, T. F. Chan, R. V. Dubey et R. L. Kress, "'Simultaneous optimisation of multiple performance criteria for a redundant manipulator", *Ad ances in Robotics, Mechatronics, and Haptic Interfaces ASME*, t. 49, p. 239–245, 1993.

[84] V. Singh, *Textbook of Anatomy Upper Limb and Thorax*. Elsevier Health Sciences, 2014, t. 1.

[85] J. Hill, *Muscle : Fundamental Biology and Mechanisms of Disease*. Academic Press, 2012, isbn : 9780123815101. adresse : https://books.google.ca/books?id=qS919qH%5C_EqUC.

[86] A. Freivalds, *Biomechanics of the upper limbs : mechanics, modeling and musculoskeletal injuries*. CRC press, 2011.

[87] M. Raison, C. Detrembleur, P. Fisette et J.-C. Samin, "Assessment of antagonistic muscle forces during forearm flexion/extension", in *Multibody Dynamics*, Springer, 2011, p. 215–238.

[88] E. Pennestri, R. Stefanelli, P. Valentini et L. Vita, "Virtual musculo-skeletal model for the biomechanical analysis of the upper limb", *Journal of biomechanics*, t. 40, n° 6, p. 1350–1361, 2007.

[89] T-Nation, *The Mobility-Stability continuum*, Consutlé le 28 février 2017. adresse : https://www.t-nation.com/img/photos/07-214-training/image020.jpg.

[90] M. Fung, S. Kato, P. J. Barrance, J. J. Elias, E. G. McFarland, K. Nobuhara et E. Y. Chao, "Scapular and clavicular kinematics during humeral elevation : a study with cadavers", *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, t. 10, n° 3, p. 278–285, 2001.

[91] M. Jackson, B. Michaud, P. Tétreault et M. Begon, "Improvements in measuring shoulder joint kinematics", *Journal of biomechanics*, t. 45, n° 12, p. 2180–2183, 2012.

[92] C. Quental, J. Folgado, J. Ambrósio et J. Monteiro, "A multibody biomechanical model of the upper limb including the shoulder girdle", *Multibody System Dynamics*, t. 28, n° 1-2, p. 83–108, 2012.

[93] Z. Dvir et N. Berme, "The shoulder complex in elevation of the arm : a mechanism approach", *Journal of biomechanics*, t. 11, n° 5, p. 219–225, 1978.

[94] J. Leroux et F. Bonnel, "Anatomy, physiology and clinical examination of the shoulder", *La Revue du praticien*, t. 49, n° 13 Suppl, p. 1383, 1999.

[95] G. Gaudet, "Classification de mouvements fantômes du membre supérieur chez des amputés huméraux à l'aide de mesures électromyographiques et cinématiques", thèse de doct., École Polytechnique de Montréal, 2016.

[96] B. Delaney, *Muscles that move the arm*, Consutlé le 28 février 2017. adresse : https://www.acefitness.org/blog/3535/muscles-that-move-the-arm.

[97] M. Laitenberger, M. Raison, D. Périé et M. Begon, "Refinement of the upper limb joint kinematics and dynamics using a subject-specific closed-loop forearm model", *Multibody System Dynamics*, t. 33, n° 4, p. 413–438, 2015.

[98] G. Wu, F. C. Van der Helm, H. D. Veeger, M. Makhsous, P. Van Roy, C. Anglin, J. Nagels, A. R. Karduna, K. McQuade, X. Wang et al., "ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion-Part II : shoulder, elbow, wrist and hand", *Journal of biomechanics*, t. 38, n° 5, p. 981–992, 2005.

[99] S. Kumar, *Biomechanics in Ergonomics, Second Edition*. CRC Press, 2007, isbn : 9780849379093. adresse : `https://books.google.ca/books?id=gDbMBQAAQBAJ`.

[100] E. Roux, S. Bouilland, A.-P. Godillon-Maquinghen et D. Bouttens, "Evaluation of the global optimisation method within the upper limb kinematics analysis", *Journal of biomechanics*, t. 35, n° 9, p. 1279–1283, 2002.

[101] M. L. Zampagni, D. Casino, S. Martelli, A. Visani et M. Marcacci, "A protocol for clinical evaluation of the carrying angle of the elbow by anatomic landmarks", *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, t. 17, n° 1, p. 106–112, 2008.

[102] C. J. van Andel, N. Wolterbeek, C. A. Doorenbosch, D. H. Veeger et J. Harlaar, "Complete 3D kinematics of upper extremity functional tasks", *Gait & posture*, t. 27, n° 1, p. 120–127, 2008.

[103] A. Kontaxis, A. G. Cutti, G. R. Johnson et H. Veeger, "A framework for the definition of standardized protocols for measuring upper-extremity kinematics", *Clinical Biomechanics*, t. 24, n° 3, p. 246–253, 2009.

[104] V. Fohanno, P. Lacouture et F. Colloud, "Improvement of upper extremity kinematics estimation using a subject-specific forearm model implemented in a kinematic chain", *Journal of biomechanics*, t. 46, n° 6, p. 1053–1059, 2013.

[105] V. M. Zatsiorsky, "Kinematics of human motion, Human Kinetics", *Urbana Champaign*, 1998.

[106] S. C. Tay, R. Van Riet, T. Kazunari, K. K. Amrami, K.-N. An et R. A. Berger, "In-vivo kinematic analysis of forearm rotation using helical axis analysis", *Clinical Biomechanics*, t. 25, n° 7, p. 655–659, 2010.

[107] A. A. Amis, "Biomechanics of the elbow", *Operative elbow surgery*, 2012.

[108] A. G. Cutti, A. Giovanardi, L. Rocchi, A. Davalli et R. Sacchetti, "Ambulatory measurement of shoulder and elbow kinematics through inertial and magnetic sensors", *Medical & biological engineering & computing*, t. 46, n° 2, p. 169–178, 2008.

[109] O. Rettig, L. Fradet, P. Kasten, P. Raiss et S. I. Wolf, "A new kinematic model of the upper extremity based on functional joint parameter determination for shoulder and elbow", *Gait & posture*, t. 30, n° 4, p. 469–476, 2009.

[110] M. A. Lemay et P. E. Crago, "A dynamic model for simulating movements of the elbow, forearm, and wrist", *Journal of biomechanics*, t. 29, n° 10, p. 1319–1330, 1996.

[111] A. Kecskeméthy et A. Weinberg, "An improved elasto-kinematic model of the human forearm for biofidelic medical diagnosis", *Multibody System Dynamics*, t. 14, n° 1, p. 1–21, 2005.

[112] P. Kasten, M. Krefft, J. Hesselbach et A.-M. Weinberg, "Kinematics of the ulna during pronation and supination in a cadaver study : implications for elbow arthroplasty", *Clinical Biomechanics*, t. 19, n° 1, p. 31–35, 2004.

[113] J. Xu, P. Kasten, A. Weinberg et A. Kecskeméthy, "Automated fitting of an elastokinematic surrogate mechanism for forearm motion from MRI measurements", in *Advances in Robot Kinematics : Motion in Man and Machine*, Springer, 2010, p. 349–358.

[114] I. Kapandji, *Anatomie fonctionnelle : hanche, genou, cheville, pied, voûte plantaire, marche. Membre inférieur*, sér. Anatomie Fonctionnelle. Maloine, 2009, isbn : 9782224032142. adresse : `https://books.google.ca/books?id=liHFQgAACAAJ`.

[115] I. Kapandji et L. Honoré, *The Physiology of the Joints : The Upper Limb, vol. 1. Churchill Livingstone*, 2007.

[116] B. J. Majors et J. S. Wayne, "Development and validation of a computational model for investigation of wrist biomechanics", *Annals of biomedical engineering*, t. 39, n° 11, p. 2807, 2011.

[117] D. Sirkett, G. Mullineux, G. Giddins et A. Miles, "A kinematic model of the wrist based on maximization of joint contact area", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H : Journal of Engineering in Medicine*, t. 218, n° 5, p. 349–359, 2004.

[118] G. Sheean, N. Lannin, L. Turner-Stokes, B. Rawicki et B. Snow, "Botulinum toxin assessment, intervention and after-care for upper limb hypertonicity in adults : international consensus statement", *European Journal of Neurology*, t. 17, n° s2, p. 74–93, 2010.

[119] J.-C. Samin et P. Fisette, *Symbolic modeling of multibody systems*. Springer Science & Business Media, 2013, t. 112.

[120] J. Taylor, *Classical Mechanics*. University Science Books, 2005, isbn : 9781891389221. adresse : `https://books.google.ca/books?id=P1kCtNr-pJsC`.

[121] R. J. Schilling, *Fundamentals of robotics : analysis and control*. Simon & Schuster Trade, 1996.

[122] S. Briot et W. Khalil, *Dynamics of Parallel Robots*. Springer, 2015.

[123] M. Kutz, *Handbook of materials selection*. John Wiley & Sons, 2002.

[124] B. Evans, *Practical 3D printers : The science and art of 3D printing*. Apress, 2012.

[125] M. Laitenberger, "Approche intégrée de modélisation cinématique et dynamique du membre supérieur", thèse de doct., École Polytechnique de Montréal, 2013.

[126] A. Albu-Schaffer et G. Hirzinger, "Parameter identification and passivity based joint control for a 7 DOF torque controlled light weight robot", in *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, IEEE, t. 3, p. 2852–2858.

[127] R. V. Patel, H. A. Talebi, J. Jayender et F. Shadpey, "A robust position and force control strategy for 7-DOF redundant manipulators", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, t. 14, n° 5, p. 575–589, 2009.

[128] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*. Prentice-Hall, New Jersey, 1996.

[129] H. Seraji, M. K. Long et T. S. Lee, "Motion control of 7-DOF arms : the configuration control approach", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, t. 9, n° 2, p. 125–139, 1993.

[130] C.-C. Cheah, M. Hirano, S. Kawamura et S. Arimoto, "Approximate Jacobian control for robots with uncertain kinematics and dynamics", *IEEE transactions on robotics and automation*, t. 19, n° 4, p. 692–702, 2003.

[131] P. Raja et S. Pugazhenthi, "Optimal path planning of mobile robots : A review", *International Journal of Physical Sciences*, t. 7, n° 9, p. 1314–1320, 2012.

[132] D. Patkó et A. Zelei, "Kinematic Redundancy Resolution in Robotics and in Human Motion–An Experimental Case Study", in *The fourth joint International conference on Multibody System Dynamics*.

[133] M. Leroux, M. Raison, T. Adadja et S. Achiche, "Combination of eyetracking and computer vision for robotics control", in *Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2015 IEEE International Conference on*, IEEE, p. 1–6.

[134] A. Traslosheros, F. Roberti, J. Sebastian, L. Angel, R. Carelli et R. Vaca, *New Visual Servoing Control Strategies in Tracking Tasks Using a PKM.* INTECH Open Access Publisher, 2010.

[135] P. Pessaux, M. Diana, L. Soler, T. Piardi, D. Mutter et J. Marescaux, "Towards cybernetic surgery : robotic and augmented reality-assisted liver segmentectomy", *Langenbeck's Archives of Surgery*, t. 400, n° 3, p. 381–385, 2015.

ANNEXE A PROGRAMMATION DE LA SIMULATION DE SUIVI DE TRAJECTOIRE

La simulation du suivi de trajectoire pour le manipulateur a été programmée avec MATLAB (Mathworks, USA) en utilisant plusieurs fonctions générées par le logiciel Robotran (UCL, Belgique) [119]. Robotran est un logiciel qui fournit des outils de modélisation très pratiques, mais sa documentation est limitée, ce qui rend son usage plus difficile. Dans l'article présenté au Chapitre 4, les algorithmes utilisés par Robotran pour résoudre la cinématique et la dynamique ont été expliqués afin de pouvoir reproduire le contenu de la simulation sans faire appel au logiciel si nécessaire. Cette section présente en premier lieu les détails de fonctionnement de la simulation incluant l'usage des fonctions générées par Robotran puis, en second lieu, présente certains résultats supplémentaires obtenus de la simulation qui n'ont pas pu apparaître dans l'article pour des raisons de concision.

Fonctionnement du logiciel Robotran et détails de la simulation

Initialisation des variables générées par Robotran

Pour obtenir les fonctions symboliques générées pour MATLAB, ou pour d'autres langages de programmation, par Robotran permettant le calcul de la cinématique et la dynamique, il faut préalablement utiliser l'éditeur de modèle de Robotran appelé MBSysPad. Cet éditeur est une interface graphique permettant de construire la chaîne cinématique à partir d'un repère global en y positionnant des joints idéaux, rotatifs ou prismatiques, ainsi que des corps rigides. Les paramètres géométriques des corps rigides sont spécifiés par la position de points d'attache dans un repère local et les paramètres inertiels doivent être ajoutés manuellement dans l'espace approprié de l'interface graphique. La chaîne cinématique modélisée pour le projet est une version coupée au joint gléno-huméral du modèle de Laitenberger et al. [97], tel qu'indiqué dans l'article. Les joints et les corps à inclure dans MBSyspad sont les mêmes que ceux illustrés sur la Figure A.1. Robotran nécessite des corps virtuels qui doivent aussi être ajoutés dans MBSyspad entre l'humérus et la boucle de PS ainsi qu'entre les extrémités distales du radius et de l'ulna. Cela permet notamment au mouvement de FE du coude d'agir sur les deux os de l'avant-bras.

Une fois ce modèle construit, MBSysPad permet la génération des fichiers symboliques décrivant la cinématique directe et la dynamique qui peuvent être utilisés pour la simulation. Afin de pouvoir y avoir accès, la simulation doit débuter par une phase d'initialisation. Cette

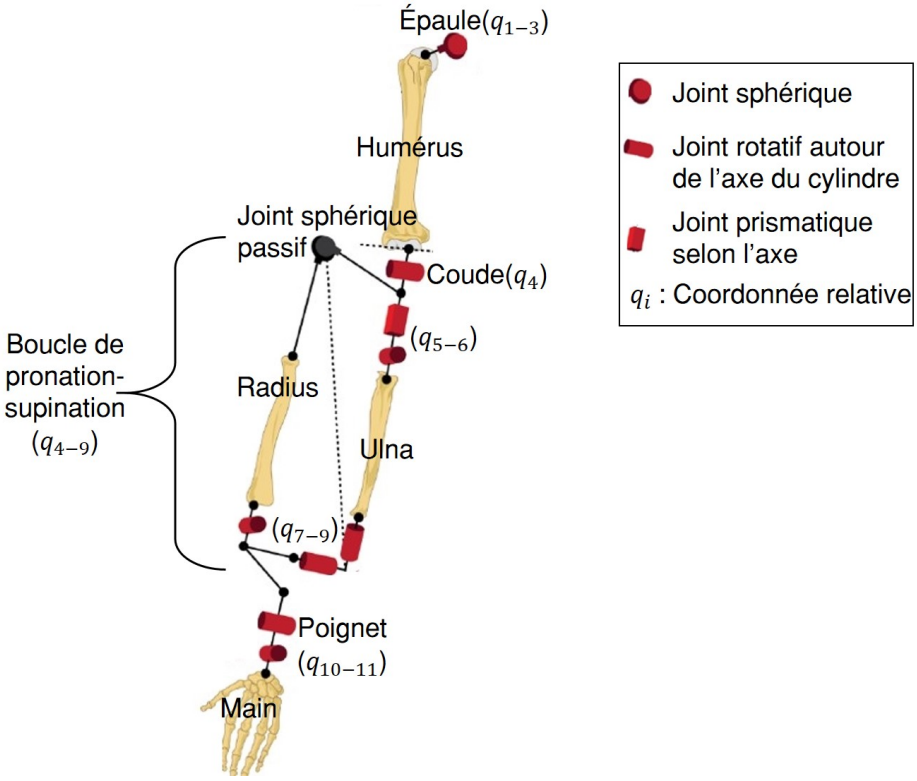

Figure A.1 Chaîne cinématique à modéliser sur Robotran

phase consiste à charger le modèle dessiné dans MBSysPad dans une structure MATLAB, comportant notamment les informations géométriques et inertielles, la nature des joints, les conditions initiales mais aussi une adresse pour accéder aux fonctions MATLAB générées précédemment.

L'initialisation se conclut finalement pas le partitionnement des coordonnées (*coordinate partitionning*) nécessaire au traitement des systèmes à boucle fermée. La démarche mathématique pour effectuer le partitionnement des coordonnées est entièrement décrite dans [119] et, tel qu'indiqué dans la section 2.3.1, correspond en bref à identifier la meilleure combinaison de variables dépendantes et indépendantes pour simplifier le traitement mathématique associé à la résolution des équations de contraintes. Cette étape est obligatoire pour le fonctionnement des algorithmes de traitement utilisés par Robotran, mais peut être considérablement accélérée si les conditions initiales imposées sur chacun des joints respectent déjà les contraintes de fermeture de boucle.

Déroulement de la boucle de simulation temporelle

Cette section a pour but d'expliquer en détails les étapes de la simulation notamment pour clarifier la séparation des cinématiques et dynamiques de l'épaule et du bras mentionnée dans l'article au Chapitre 4 et pour compléter l'information qui n'a pas été indiquée dans l'article pour des raisons de concision.

Les paramètres de la simulation sont résumés dans le Tableau A.1.

Tableau A.1 Paramètres de la simulation

Paramètre	Variable	Valeur
Durée de la simulation	t_{max}	10 s
Pas de temps	Δt	0.01 s
Pas de temps du solveur ODE45	-	0.001s
Seuil de tolérance des contraintes	-	10^{-9}
Pose initiale	$q_i \forall i$	Correspondante à la pose initiale de la trajectoire
Vitesse initiale	$\dot{q}_i \forall i$	0
Accélération initiale	$\ddot{q}_i \forall i$	0

La boucle temporelle itère sur les valeurs entière de j tel que l'inéquation A.1 est respectée.

$$j\Delta t \leq t_{max} \tag{A.1}$$

Ainsi, pour chaque valeur de j, la simulaiton débute en déterminant la trajectoire désirée. Cette trajectoire est définie par une matrice colonne comportant la position tridimensionnelle désirée de l'effecteur du manipulateur et les trois angles d'Euler définissant son orientation. Tel qu'indiqué dans l'article, la position $\boldsymbol{x}$ en fonction du temps a été choisie, comme rappelé par l'équation A.2, pour produire des mouvements dans toutes les directions.

$$\boldsymbol{x}(j) = \left(\boldsymbol{x}_2 - \boldsymbol{x}_1 \frac{t_{max} - j\Delta t}{t_{max}} + \boldsymbol{x}_1\right) \cos(j\Delta t) \tag{A.2}$$

où :

- $\boldsymbol{x}(j)$ est la position désirée au pas de temps j.
- $\boldsymbol{x}_i$ sont des positions telles qu'il existe une solution à la cinématique inverse du robot qui peut les atteindre.

L'orientation désirée, quant à elle, a été déterminée en définissant les angles d'Euler d'après l'équation A.3.

$$\alpha_i(j) = \frac{\alpha_{i_0}}{\sin(\omega_i t_{max})} \sin(\omega_i[t_{max} - j\Delta t]) \tag{A.3}$$

où :

- L'indice i est associé au i^e angle d'Euler à imposer.
- $\alpha_i(j)$ est la valeur de l'angle i à imposer au pas de temps j.
- α_{i_0} est la valeur de α_i respectant les conditions initiales.
- ω_i est une fréquence angulaire spécifique à la trajectoire de l'angle i. Les valeurs utilisées dans la simulation variaient entre 0.25 et 2 rad/s.

Suite à la déclaration de la trajectoire désirée, la simulation enchaîne avec la cinématique inverse du bras, calculée tel qu'indiquée dans l'article, par une méthode d'optimisation avec contraintes non-linéaires. La cinématique inverse indique alors la position ($\boldsymbol{q}_j$) désirée au pas de temps j pour chacun des joints du modèle biomécanique. La vitesse ($\dot{\boldsymbol{q}}_j$) et l'accélération ($\ddot{\boldsymbol{q}}_j$) désirées pour ce pas de temps sont calculées avec une approximation aux différences finies d'ordre 1 arrière tel qu'indiqué dans l'équation A.4.

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{q}}_j &= \tfrac{\boldsymbol{q}_j - \boldsymbol{q}_{j-1}}{\Delta t} \\ \ddot{\boldsymbol{q}}_j &= \tfrac{\dot{\boldsymbol{q}}_j - \dot{\boldsymbol{q}}_{j-1}}{\Delta t} \end{aligned} \tag{A.4}$$

Les valeurs de $\boldsymbol{q}_{1,2,3}$ sont ensuite utilisées pour calculer la matrice d'orientation $\boldsymbol{Q}$ nécessaire en entrée de la cinématique inverse de l'agile eye qui donne en sortie la position nécessaire des actionneurs au niveau de l'épaule. La vitesse et l'accélération désirée de ces actionneurs sont alors également calculées avec une différence finie d'ordre 1 arrière comme à l'équation A.4.

Ces valeurs désirées sont ensuite passées à l'algorithme de dynamique inverse de l'agile eye avec la position, la vitesse et l'accélération des joints au pas de temps précédent. En faisant l'approximation que l'ensemble du bras allant de l'humérus jusqu'à l'effecteur est immobile pendant l'entièreté du pas de temps, l'inertie à mettre en mouvement est calculée. Avec toutes ces données, l'algorithme de Gosselin [68] peut alors être exécuté pour obtenir le moment à appliquer aux actionneurs pour obtenir la trajectoire voulue à l'épaule.

Avec l'hypothèse que la trajectoire de l'agile eye produite par la valeur des moments trouvées précédemment correspondra de façon approchée à la trajectoire désirée pour l'épaule, on peut utiliser la fonction de Robotran permettant de calculer la dynamique inverse du modèle pour trouver la valeur des moments à appliquer à ses joints pour obtenir la trajectoire désirée.

Les valeurs des moments obtenues à l'aide des calculs de dynamique inverse sont utilisées

pour établir la commande à l'aide du contrôleur PD décrit dans l'article, dont les matrices de gain proportionnel et dérivé ont été ajustées par essai-erreur pour stabiliser le système.

La simulation se poursuit avec l'exécution des algorithmes de dynamique directe. D'abord, toujours en considérant le reste du bras immobile pendant le mouvement, l'accélération aux actionneurs de l'agile eye est calculée par inversion numérique de la dynamique inverse en prenant comme entrée les moments calculés par le contrôleur, puis les vitesses et positions correspondant aux joints sont calculées à l'aide d'un intégrateur d'ordre zéro, tel qu'indiqué dans l'article. Ces données sont ensuite utilisées comme entrée de la cinématique directe de l'agile eye pour établir la trajectoire des joints de l'épaule du modèle Robotran.

Pour utiliser dans ce contexte la fonction Robotran permettant de calculer la dynamique directe du bras et obtenir l'accélération à chacun des joints, il faut faire deux petits ajustement au code automatiquement généré par Robotran. D'une part, il faut changer la nature des joints de l'épaule, considérés comme actionnés pendant la dynamique inverse, en joints conduits, c'est-à-dire en joints dont la trajectoire est fixée, et indiquer à la fonction ladite trajectoire telle que sa position, sa vitesse et son accélération en fonction du temps correspondent au mouvement produit à l'étape précédente pour les calculs de la dynamique de l'épaule. D'autre part, il faut passer à la fonction Robotran la valeur du moment à appliquer à chacun des autres joints calculée par le contrôleur, ce qui peut être facilement réalisé dans MATLAB à l'aide d'une variable globale sans nuire au reste de l'exécution des fonctions automatiquement générées par Robotran. La dynamique est enfin calculée par la fonction dédiée qui utilise un solveur ODE45 intégré dans MATLAB pour déterminer le mouvement produit pendant le pas de temps. Les valeurs de position, vitesse et accélération des joints à la fin du pas de temps sont considérées comme la sortie de la dynamique directe.

Pour terminer la boucle itérative, la cinématique directe du reste du bras peut être calculée à l'aide des fonctions symboliques générées par Robotran afin de connaître la position de l'effecteur. Ces informations sont nécessaires pour confirmer la validité des résultats de simulation, notamment pour s'assurer que la trajectoire à suivre a bien été suivie ou pour calculer les erreurs de suivi, mais ne sont ultimement pas nécessaire pour passer à l'itération $j + 1$ et reprendre la boucle depuis le début.

ANNEXE B GÉOMÉTRIE DE L'*AGILE EYE*

Le design géométrique de l'agile eye est expliqué dans les divers articles de Gosselin et al. à son sujet. Cependant, bien qu'il ne s'agisse que de calculs géométriques, la production des plans de chacune de ses pièces demeure relativement complexe à réaliser puisque ces informations sont difficiles à rassembler. De plus, le suivi de ces indications pour la conception est rendu encore plus complexe par un problème de perspective sur l'image utilisée dans la majorité des articles de Gosselin (voir Figure B.1) pour représenter le MPS quelconque qui peut porter à positionner un certain angle au mauvais endroit. Le but de cette annexe est de présenter étape par étape les relations géométrique qui existent entre les différentes pièces de l'agile eye pour faciliter son dessin.

Les principaux paramètres géométriques définissant un MPS sont illustrés sur la Figure B.1.

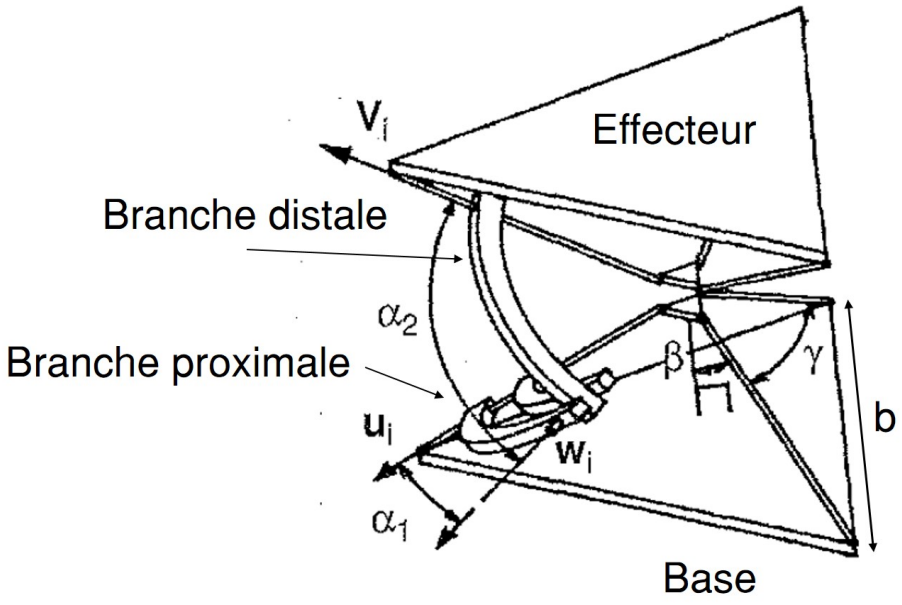

Figure B.1 Principaux paramètres géométriques définissant un MPS (Image adaptée de [69])

Où :

- $\boldsymbol{u}_i, \boldsymbol{v}_i, \boldsymbol{w}_i$ sont des vecteurs passant par le centre de rotation du mécanisme et l'axe de l'actionneur, l'axe de contact à l'effecteur et l'axe du joint entre les branches proximale et distale respectivement pour la chaîne cinématique i.
- α_1, α_2 sont respectivement les angles entre les vecteurs $\boldsymbol{u}_i$ et $\boldsymbol{w}_i$ ainsi que $\boldsymbol{v}_i$ et $\boldsymbol{w}_i$.

— γ est l'angle entre les vecteurs $\boldsymbol{u}_i$
— β est l'angle entre les plans formés par la combinaison linéaire de paires de vecteurs $\boldsymbol{u}_i$ et la base. Attention, l'erreur de perspective sur la Figure de Gosselin est celle liée à cet angle.
— b est la longueur d'un côté de la base.

L'agile eye est un cas particulier du MPS quelconque tel que la base et le prolongement des vecteurs $\boldsymbol{u}_i$ produit un tétraèdre et tel que les variables précédentes prennent les valeurs indiquées par l'équation B.1.

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \alpha_2 &= 90^\circ \\ \gamma &= 90^\circ \\ \beta &= \arcsin(\tfrac{2}{\sqrt{3}}) \sin(\tfrac{\gamma}{2}) \end{aligned} \tag{B.1}$$

L'échelle et les dimensions des pièces sont alors uniquement des fonctions de la longueur de la base b et de ces variables.

La première pièce à paramétrer en fonction de ces variables est le joint rotatif, qui possède deux paramètres à ajuster : son inclinaison (θ) par rapport à la base et la position (d) du trou par rapport au point de flexion. Elle possède également deux variables de design, à savoir la position (r) par rapport au sommet de la base et la hauteur (h) du point de flexion. Ces variables sont illustrées sur la Figure B.2.

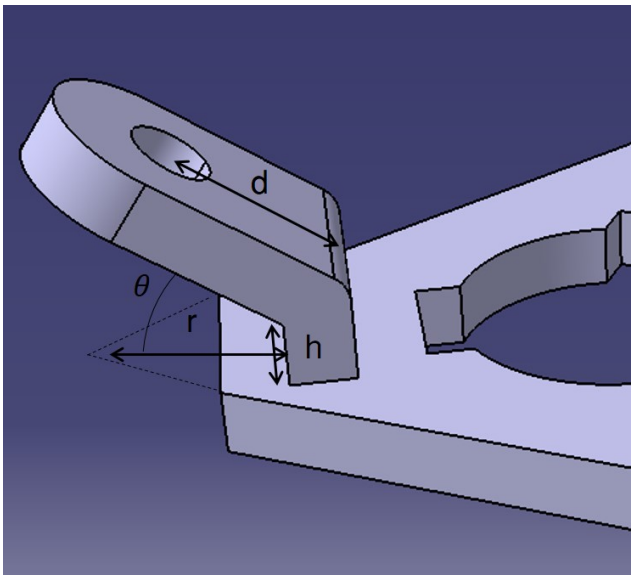

Figure B.2 Paramètres géométriques du joint rotatif de l'agile eye

Les valeurs des paramètres sont donc données par l'équation B.2.

$$\begin{aligned} \theta &= 90° - \beta \\ k &= \frac{r}{\tan(\beta)} \\ x &= \frac{k}{\tan(\beta)+\cot(\beta)} \\ y &= \tan\beta x \\ d &= \sqrt{y^2 + (r-x)^2} \end{aligned} \tag{B.2}$$

Les autres pièces à paramétrer sont les membrures proximales et distales. Ce sont des arcs de cercles appartenant à des sphères concentriques. Celles-si ont chacun un paramètre à ajuster : leur rayon (R_1, R_2, R_3). Ces paramètres dépendent de trois variables de conception : l'épaisseur du joint rotatif (e_1), l'épaisseur des membrures (e_2) et le jeu (j) laissé entre les membrures qui sert à laisser de la place pour les têtes de vis. Ainsi, on a les paramètres indiqués par l'équation B.3.

$$\begin{aligned} R_1 &= b - \sqrt{x^2 + y^2} - e_1 \\ R_2 &= R_1 - e_2 - j \\ R_3 &= R_2 - e_2 - j \end{aligned} \tag{B.3}$$

Le suivi de ce paramétrage devrait ainsi permettre de reproduire rapidement des plans pour l'agile eye. Dans l'optique où l'on souhaiterait changer l'échelle du mécanisme, les paramètres précédent permettent de changer seulement la dimension de la base (b) pour que les autres paramètres s'ajustent automatiquement.

ANNEXE C ÉTAPES SUGGÉRÉES VERS UN PRODUIT FINI

Le bras robotique anthropomorphique conçu dans le cadre de ce projet a permis de montrer qu'il était possible de reproduire la plage de mouvement du bras humain en reproduisant sa chaîne cinématique. Dans un contexte de recherche, un tel prototype peut être utilisé pour concevoir et tester des algorithmes de contrôle ou de planification de trajectoire par exemple. Par contre, pour le contexte plus large qui entourait ce projet qui consistait à concevoir un bras robotique d'assistance, des améliorations esthétiques et pratiques devraient être apportées au design du bras afin de le rendre plus robuste et plus esthétique afin qu'il soit commercialisable. Ces améliorations ont été mentionnées au Tableau 6.1 et seront maintenant expliquées avec plus de détails.

1. **Intégrer de l'espace pour les pièces/fils électroniques dans le design :** Une considération minimale a déjà été faite dans le design pour permettre le passage des fils alimentant les actionneurs dans les différentes pièces, mais seulement parce que, sans ces ajustements, les actionneurs n'auraient pas pu être mis en place. Les fils demeurent libres, ce qui augmente les risques qu'ils s'emmêlent ou bien qu'ils entravent le robot pendant son mouvement. L'humérus a déjà été pensé comme une cavité afin d'éviter pour permettre le passage des fils pour éviter que cela ne se produise entre le coude et l'épaule, mais il faudrait une solution similaire pour s'assurer de la même chose entre le poignet et le coude. Il faut aussi mentionner qu'aucun espace n'a été réservé pour y installer les différentes pièces d'électronique (batterie/source de tension, microcontrôleur, etc.). Le volume intérieur de l'agile eye est tout indiqué pour y installer ces pièces, mais il faudra ajuster la forme de la base pour ce faire.
2. **Remplacer les pièces imprimées par des produits achetés lorsque possible :** La qualité de pièces faites industriellement devrait toujours surpasser la qualité de pièces à l'impression 3D. Certes, la plupart des pièces du robot doivent être faites sur mesure, mais les quelques unes qui ne le doivent pas, notamment les engrenages utilisés pour la mise en mouvement du coude, devraient être remplacées par des pièces de qualité supérieure. Les joints passifs au niveau du poignet bénéficierait également d'intégrer des roulements à billes pour diminuer le frottement. L'intégration de ces pièces produites commercialement pourrait nécessiter certains ajustements au design des pièces sur lesquelles elles sont attachées.
3. **Diminuer la taille des actionneurs :** Il a été mentionné dans le Chapitre 6 que la taille du moteur contrôlant le mouvement de PS limite l'amplitude du mouvement

parce qu'il produit un accrochage avec le radius. Il a également été mentionné que la masse globale du robot devrait être réduite afin de diminuer les efforts à fournir par les actionneurs. Or, les actionneurs au niveau du coude et du poignet contribuent de façon non-négigeable à la masse et l'inertie du robot. Il serait donc très avantageux d'investir dans des actionneurs plus coûteux qui auraient une plus petite taille et une plus petite masse.

4. **Protéger le mécanisme avec une enveloppe protectrice :** Le but d'une enveloppe protectrice est double. D'une part, il assure la protection du mécanisme contre les accrochages, notamment en empêchant un objet d'être insérer dans la boucle de PS et en empêchant dans une certaine mesure la poussière et l'humidité de potentiellement abîmer les pièces électroniques et les actionneurs. D'autre part, elle joue un rôle esthétique, en cachant les différents fils, pièces et mécanismes et en donnant une allure plus lisse et moderne au produit. Il va de soi qu'une telle enveloppe ne doit pas interférer avec le mouvement du bras. Cette étape a déjà été entamée par Régis Ngoufo, dans le cadre de son Projet Intégrateur III.
5. **Remplacer la structure en PLA par un matériau plus solide et léger :** Le prototypage rapide est, comme son nom l'indique, approprié pour du prototypage. Pour obtenir un produit commercialisable, il conviendrait d'investir pour faire machiner les pièces de façon à ce qu'elles soient de meilleure qualité, mais aussi dans un matériau plus léger et plus solide que le PLA utilisé pour l'impression 3D. La légèreté gagnée rend plus pratique l'utilisation du bras d'assistance, le rendant plus facilement déplaçable et moins énergivore, et sa solidité rendra le produit plus durable. De bons candidats de matériaux possédant ces propriétés sont l'aluminium et la fibre de carbone.