

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

Conception et validation expérimentale d'un
robot manipulateur 6 DDL actionné par des
embrayages magnétorhéologiques
semi-délocalisés

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Mathieu Gervais

Sherbrooke (Québec) Canada

Septembre 2021

MEMBRES DU JURY

Jean-Sébastien Plante

Directeur

Alexandre Girard

Évaluateur

David Rancourt

Évaluateur

RÉSUMÉ

L'utilisation de robots manipulateurs est un standard en industrie pour automatiser des chaînes de production. Ces robots sont précis, robustes et rapides. Pour atteindre leur performance, ils sont conçus avec des actionneurs puissants et ils sont faits de pièces massives. Lorsqu'ils sont en utilisation, ces robots doivent être placés dans une zone clôturée puisqu'ils représentent un danger pour les travailleurs. Pour pallier ce problème, l'industrie se tourne vers les robots collaboratifs. Ces robots normalisés sont conçus pour être sans danger pour les utilisateurs ce qui permet une intégration facile et abordable. Plusieurs stratégies comme l'utilisation d'algorithmes de contrôle et des designs mécaniques sont utilisés pour réduire le danger d'un robot manipulateur pour un utilisateur.

Ce mémoire présente un manipulateur de 6 degrés de liberté (DDL) actionné par des embrayages magnétorhéologiques (MR) semi-délocalisés. Le manipulateur a été conçu pour atteindre ou dépasser les performances des bras robots collaboratifs commerciaux dans le but de valider la capacité des actionneurs MR pour des applications en robotique collaborative. Le manipulateur a été dimensionné pour avoir des spécifications similaires aux robots collaboratifs UR5 et WAM. Les spécifications ont été validées par les mesures expérimentales. Le manipulateur a une masse en mouvement de seulement 5.3 kg et il peut déplacer une masse de 4.5 kg à 1 m/s avec une portée de 0.885 m. De plus, la bande passante en force est au-dessus de 50 Hz et la friction des joints est de maximum 10 % du couple maximum du joint. Aussi, le manipulateur est intrinsèquement sécuritaire et tolérant aux impacts. En somme, il est possible de dire qu'un actionnement MR semi-délocalisé est une solution prometteuse pour la robotique collaborative, mais d'autres mesures expérimentales avec le manipulateur sont nécessaires pour que la technologie MR atteigne son plein potentiel en robotique. En outre, il serait nécessaire de mesurer la capacité du manipulateur à produire des murs virtuels, de mesurer la précision du positionnement du manipulateur et de mesurer l'énergie transmise par le bras au moment d'un impact.

Mots-clés : Bras collaboratif, Manipulateur à câbles, Embrayages magnétorhéologiques

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier les professeurs, les étudiants et les professionnels du laboratoire Createk qui s'investissent et rendent l'environnement de travail stimulant et fonctionnel. Merci à toute l'équipe MR qui m'a supporté dans les avancements de mon projet. En particulier à LP pour l'aide avec le contrôle du manipulateur, Mike pour m'avoir appuyé dans la fabrication de plusieurs pièces et JS pour m'avoir donné la chance de pouvoir réaliser mon projet.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Mise en contexte et problématique	1
1.2	Définition et objectifs du projet de recherche	2
1.3	Contributions originales	3
1.4	Plan du mémoire	4
2	ÉTAT DE L'ART	5
2.1	Bras robot léger	5
2.2	Actionnement délocalisé	6
2.3	Actionneurs à série élastique	7
2.4	Actionnement magnétorhéologique	8
2.5	Conclusion état de l'art	10
3	Article	11
3.1	Avant-propos	11
3.2	Titre et Résumé français	11
3.3	Article	12
3.4	Abstract	12
3.5	Introduction	13
3.5.1	Background	13
3.5.2	Approach	15
3.6	6 DOF Robotic Manipulator Design	16
3.6.1	Design Requirements	16
3.6.2	Proposed Semi-Distributed Design	18
3.6.3	3 DOF Robotic Arm Design	20
3.6.4	3 DOF Forearm Design	22
3.6.5	MR Actuation	23
3.7	Experimentation and Results	23
3.7.1	Torque and Frequency Response	24
3.7.2	MR Clutches and Transmission Friction Forces	27
3.7.3	Impact Resistance and Safety	27
3.7.4	Costs	28
3.8	Discussion, Conclusion and Perspective	28
4	CONCLUSION	31
4.1	Sommaire	31
4.2	Perspectives et travaux futurs	31

LISTE DES FIGURES

1.1	Cellule robotisée industrielle.	1
1.2	CAO du manipulateur.	3
2.1	Bras robot UR5 de l'entreprise Universal Robot [34].	5
2.2	Bras LIMS [15].	6
2.3	Bras robot WAM de l'entreprise Barrett [16].	7
2.4	Bras robot Baxter de l'entreprise Rethink Robotics [23].	8
2.5	Bras pHRI [32].	9
3.1	Delocalized and semi-delocalized actuation systems.	16
3.2	CAD of the proposed 6 DOF semi-delocalized robotic manipulator.	18
3.3	Detailed presentation of the arm actuation.	20
3.4	Detailed presentation of the arm actuation module.	21
3.5	Detailed presentation of the forearm actuation.	22
3.6	Detailed presentation of the forearm actuation module.	22
3.7	Detailed presentation of the forearm clutch.	23
3.8	Manipulator static bench tests.	24
3.9	Arm joint A, B and C torque range and frequency response measures.	25
3.10	Forearm joint D, E and F torque range and frequency response measures.	26
3.11	Impact resistance tests.	27
3.12	Arm and hapctic glove VR system.	29

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Spécifications du robot manipulateur MR comparativement au WAM [16] et au UR5 [34].	10
3.1	MR robotic Manipulator specifications compared to WAM [16] and UR5 [34].	16
3.2	6 DOF Robotic manipulator performance.	19
3.3	Clutches specifications.	23
3.4	Targeted specifications of the MR robotic arm compare to those measured, WAM [16] and UR5 [34].	28

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

Les bras robots ont été introduits dans les usines pour réaliser des opérations dangereuses avec précisions et sans relâches [1]. Ces avantages font des robots un choix de prédilection comme composant dans une chaîne de montage d'une usine manufacturière. En revanche, les robots industriels présentent un risque pour les humains, une collision entre un travailleur et un robot peut engendrer des blessures graves voir mortel. Pour réduire les risques, les bras sont placés dans des espaces clôturés et contrôlés pour que ce soit impossible d'entrée en contact avec un opérateur (voir figure 1.1), ce qui augmente le prix et rend difficile la reconfiguration d'une cellule robotique [2]. Les bras robotiques sont conçus avec des actionneurs puissants et leurs pièces mobiles sont massives générant une inertie reflétée élevée et de grandes forces en cas d'impact [3]. L'étroite collaboration des robots avec l'homme est la clé de la prochaine révolution industrielle [1]. L'idée est de créer des usines intelligentes et modulables pour répondre à la demande dynamique des clients. Ainsi, les robots doivent interagir en toute sécurité avec travailleurs afin qu'ils puissent combiner leurs compétences et travailler ensemble.

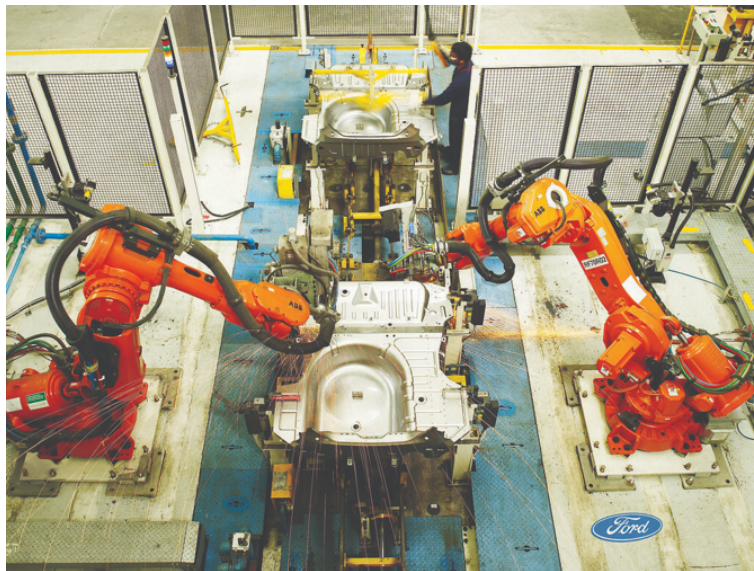


Figure 1.1 Cellule robotisée industrielle.

La dangerosité d'un bras robotique peut être réduite en utilisant des programmes et des capteurs, mais même les systèmes les plus robustes peuvent réagir de manière inattendue à la suite d'un défaut dans un capteur ou d'une erreur logicielle [4]. Pour être intrinsèquement sécuritaire, un bras robot doit avoir une faible masse en mouvement. Ainsi, la masse du manipulateur et la masse de l'objet déplacé par le robot doivent être limitées. L'ultime bras collaboratif doit être léger, avoir une grande bande passante en force, avoir une transmission sans jeu et avoir de faibles pertes par frottement [5], [6].

Plusieurs configurations de bras robots collaboratifs ou cobots, ont été développées en industrie et en laboratoire, mais aucune n'est capable d'atteindre les performances des bras robots industriels tout en étant sécuritaire. Les embrayages MR ont été utilisés avec succès dans différentes applications où il y a une collaboration homme-machine. Ils possèdent des avantages fondamentaux qui les rendent compétitifs par rapport à d'autres types d'actionnement. Leur potentiel n'a jamais été pleinement exploité dans une configuration de robot manipulateur collaboratif.

1.2 Définition et objectifs du projet de recherche

Ce projet est la suite d'un projet majeur de conception qui a conçu et assemblé un bras robot 3 DDL actionné par des embrayages MR délocalisés (*Robotic arm* sur la figure 1.2). Le but du projet présenté dans ce mémoire est d'évaluer le potentiel des embrayages MR dans une configuration de robot manipulateur 6 DDL semi-délocalisé. Pour se faire un avant-bras 3 DDL doit être ajouté au bras robot déjà existant (*Forearm* sur la figure 1.2).

Pour réaliser le projet, une évaluation des spécifications des robots collaboratifs populaires et des ouvrages en robotiques est nécessaire pour déterminer les requis du manipulateur MR. Cette analyse permet de comprendre les limites que doit respecter un bras robot pour être sécuritaire et quelles capacités le manipulateur doit avoir pour être compétitif par rapport aux autres. Ensuite, une conception itérative et détaillée de l'avant-bras est réalisée tout en tenant compte des requis. Les nombreuses itérations de la conception permettent de réduire les erreurs et de faire converger les concepts vers la meilleure solution possible. Par la suite, les différentes pièces peuvent être fabriquées et l'avant-bras peut-être assemblé. Finalement, des mesures expérimentales doivent être faites sur le robot manipulateur pour valider qu'il atteint les requis spécifiés.

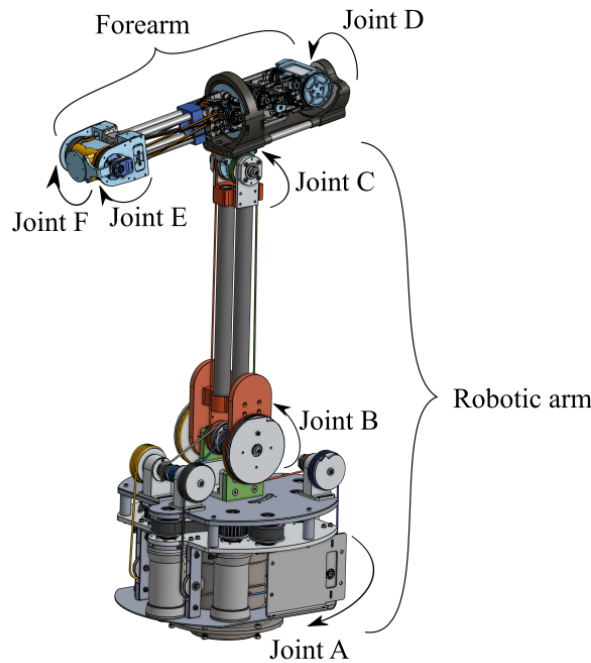


Figure 1.2 CAO du manipulateur.

L'objectif du projet est de mesurer si un manipulateur MR semi-délocalisé peut atteindre ou dépasser les performances des bras robots collaboratifs commerciaux dans le but de valider la capacité des actionneurs MR pour des applications en robotique collaborative. Le projet consiste à faire l'exécution des objectifs suivant :

- Évaluation des requis de performances du manipulateur.
- Conception détaillée et assemblage de l'avant-bras.
- Validation expérimentale du manipulateur.

1.3 Contributions originales

Les bras collaboratifs les plus populaires utilisent des architectures et des technologies d'actionnement développées dans les années 1995 [7]. Très peu de bras utilisent une approche différente en matière d'actionnement ou d'architecture pour pallier les limites des bras traditionnels.

L'utilisation d'embrayage MR en robotique est très peu répandue. Cet ouvrage présente le premier robot manipulateur 6 degrés de liberté avec une architecture semi-délocalisé qui utilise des embrayages MR comme actionnement. Le manipulateur est dimensionné pour atteindre des performances similaires à un cobot commercial en termes de charge utile, de vitesse et de portée. De plus, la configuration permet au manipulateur d'avoir une faible

masse en mouvement, d'avoir une grande bande passante en force, tout en utilisant une transmission sans jeu et avec de faibles pertes de frottement.

Finalement, l'analyse expérimentale démontre que le manipulateur atteint et dépasse les requis de performance ce qui le rend compétitif par rapport aux autres bras collaboratifs. Ce mémoire démontre que les actionneurs MR ont un avenir prometteur pour les cobots, même si des travaux sont encore nécessaires pour que l'actionnement MR atteigne son plein potentiel en robotique.

1.4 Plan du mémoire

Cet ouvrage est séparé en quatre chapitres, le premier, présenté plus haut, introduit le projet, présente les objectifs et la contribution scientifique. La prochaine section, l'état de l'art, présente les différentes technologies d'actionnement et les principales architectures utilisées pour des bras robots. Puis, une conclusion de l'état de l'art est faite et elle permet de positionner l'architecture du manipulateur proposé dans ce mémoire par rapport aux autres. Par la suite, l'article qui a été soumis à ICRA 2022 est présenté. Pour finir, une conclusion du projet est faite en présentant un retour sommaire sur les résultats et les performances du bras, puis des propositions pour les travaux futurs sont présentées.

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART

Différentes approches sont utilisées pour faire un bras robot collaboratif. Les architectures se caractérisent par le type d'actionnement utilisé et le positionnement des actionneurs. Les configurations peuvent être séparées en trois catégories : les bras robots légers, les bras avec un actionnement délocalisé et les actionneurs à série élastique.

2.1 Bras robot léger

La plupart des grandes marques de robot proposent leur modèle de bras collaboratifs avec des membrures légères. Dans cette configuration, des actionneurs avec un grand ratio de transmission sont placés en série à chacun des joints comme sur le populaire UR5 de l'entreprise Universal Robot présenté à la figure 2.1.

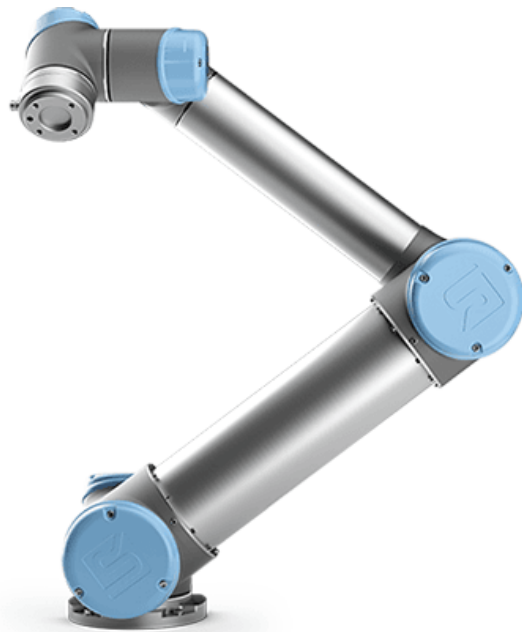


Figure 2.1 Bras robot UR5 de l'entreprise Universal Robot [34].

Cette configuration a initialement été développée par le centre de recherche DLR [7]. Le but du projet était de développer un bras robotique possédant un ratio masse/charge utile de 1 ce qui a été rendu possible grâce à la structure légère du bras et à une transmission utilisant des engrenages à onde de déformation. Cette transmission très compacte est capable de produire un grand ratio. Ce type d'actionnement maintenant très répandu est

utilisé dans les bras de l'entreprise Universal Robot. Les engrenages à onde de déformation communément appelée *Harmonic Drive* produisent peu de jeu [8], mais ils induisent un important frottement dans la transmission [9, 10] limitant le rétroactionnement et la vitesse du bras robot [11, 12]. Des algorithmes de contrôle utilisant des capteurs de forces ont été développés pour rendre ce type de bras plus sécuritaire, mais l'utilisation du contrôleur reste stable seulement sur une plage limitée [13]. Sans compter que la vie des *Harmonics Drives* diminue linéairement après chaque impact [14] ce qui devient contraignant lorsque le bras est utilisé dans un environnement où des impacts ou des collisions sont attendus.

2.2 Actionnement délocalisé

L'idée derrière un bras avec une configuration délocalisé est de réduire la masse en mouvement du bras en positionnant les actionneurs à sa base et d'utiliser des câbles ou des courroies pour transférer le mouvement des actionneurs jusqu'aux joints. Ainsi, la masse importante des actionneurs ne se déplace pas dans l'espace avec les membrures du bras. Généralement, un bras délocalisé va utiliser une suite de composants de transmission pour transmettre le mouvement des actionneurs aux joints [15]. Par exemple, le bras LIMS présenté à la figure 2.2 utilise une série de courroies, de câbles et d'arbres de transmission pour transmettre la puissance du moteur jusqu'au dernier joint du bras.

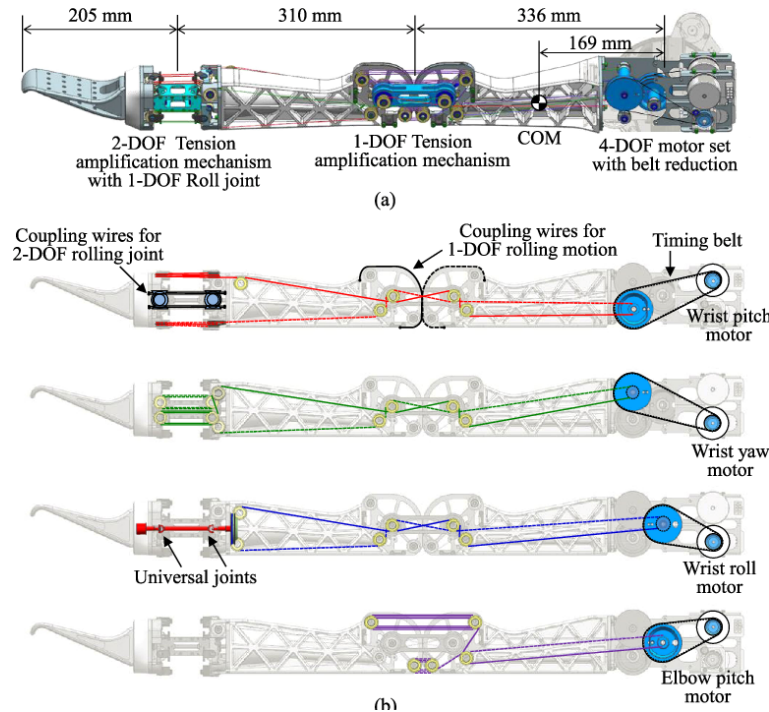


Figure 2.2 Bras LIMS [15].

La figure 2.3 présente le bras WAM de la société Barrett qui utilise une configuration délocalisée. Dans ce cas-ci, la transmission de puissance se fait à l'aide de câbles et de cabestans ce qui permet d'avoir une transmission avec de faibles pertes par frottement et aucun jeu [16]. De plus, le bras a une masse en mouvement de seulement 7 kg [17]. Par contre, le système ne permet pas de compenser pour l'étirement des câbles, une maintenance doit être faite toutes les 80 heures d'utilisation pour ajuster la tension des câbles [18] ce qui limite l'intégration du bras en industrie.



Figure 2.3 Bras robot WAM de l'entreprise Barrett [16].

2.3 Actionneurs à série élastique

Les actionneurs à série élastique assurent la sécurité d'un actionneur en utilisant un élément élastique stratégiquement positionné dans la transmission pour absorber l'énergie en cas d'impact [19]. Le feu robot Baxter de la société Rethink Robotics présenté à la figure 2.4 est un exemple de bras conçu avec des actionneurs à série élastique. Par contre, l'ajout d'un élément élastique dans la transmission a pour effet de limiter la bande passante d'actionnement [20]. Les actionneurs à rigidités variables (VSAs) ont été développés pour surpasser ce compromis. Dans cette configuration, la rigidité de l'élément élastique est ajustée en temps réel en fonction de la commande [21, 22]. Par contre, les VSAs restent un compromis puisqu'ils ne peuvent pas être sécuritaires et avoir une grande bande passante d'actionnement simultanément.



Figure 2.4 Bras robot Baxter de l'entreprise Rethink Robotics [23].

2.4 Actionnement magnétorhéologique

L'actionnement MR est une solution alternative aux paradigmes de conception des robots collaboratifs. Généralement ce type d'actionnement est composé d'un moteur qui entraîne un ou plusieurs embrayages qui transmettent et modulent le couple aux joints. L'avantage fondamental des embrayages MR est qu'ils découplent l'inertie de la source de puissance du système actionné. La réponse dynamique du système est ainsi seulement affectée par la sortie de l'embrayage MR. La transmission de couple se fait à partir de la variation de la limite élastique de fluide soumis à un champ magnétique. La fabrication d'un embrayage MR ne nécessite aucune pièce usinée avec précision, puisqu'aucune pièce n'est en contact dans l'assemblage ce qui les rend abordables, fiables et intrinsèquement résistants aux chocs. Les embrayages MR ont un rotor de sortie qui possède moins d'inertie qu'un moteur sans balai équivalent, ils ont une faible force de rétroactionnement et ils sont faciles à contrôler en force [25]. Différents projets ont montré que la technologie MR a un grand potentiel dans des tâches d'interaction homme-machine comme dans des bras robots portatifs [26], des robots haptiques [27] et des exosquelettes [31].

Le pHRI présenté à la figure 2.5 est un bras robot à cinq degrés de liberté actionné par des embrayages MR et développé pour des interactions avec des humains [32]. Dans ce concept, un seul moteur, placé à la base du bras, est utilisé pour actionner les différents embrayages. Des séries de courroies et d'arbre de transmission actionnent les cinq paires d'embrayages positionnés à chacun des joints du robot. Les paires d'embrayages actionnent directement chacun des joints de manière à ce qu'un embrayage de 20 Nm produise un joint de 20 Nm. Cette architecture permet au bras un rétroactionnement facile, par contre le bras possède une importante masse en mouvement puisque les embrayages de 20 Nm pèsent 1.8 kg chacun. En considérant seulement les embrayages, le manipulateur a une masse d'au moins 18 kg ce qui est élevé par rapport à la masse en mouvement de 7 kg du WAM [17] et comparable à la masse du robot UR5 de 18.4 kg [34].

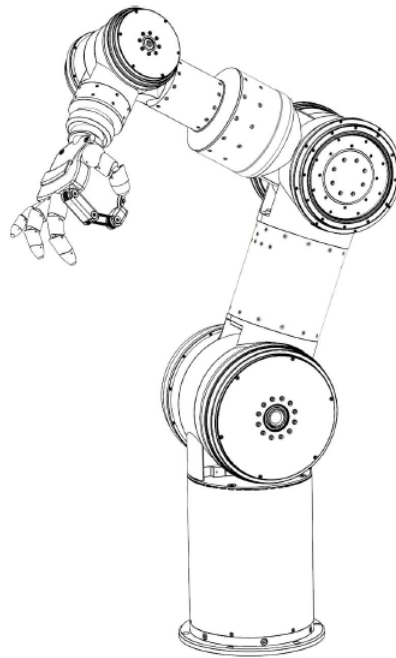


Figure 2.5 Bras pHRI [32].

2.5 Conclusion état de l'art

Pour être contrôlable avec une grande précision, le bras robot doit n'avoir aucun jeu, avoir peu de frottement et une grande bande passante [5], [6]. Le manipulateur doit avoir une bande passante de plus de 30 Hz [35] ce qui lui permet de réagir aussi rapidement qu'un humain en cas d'impact. Les études faites dans le laboratoire ont démontré que pour être compensée par le contrôleur la friction d'un joint ne doit pas dépasser 10% de son couple maximal. De plus, pour ne pas mettre en danger un utilisateur, le bras robot doit avoir une faible masse en mouvement. Considérant que le bras se déplace à une vitesse de 1 m/s et qu'il ne déplace aucune charge utile, la masse en mouvement du bras ne peut pas être plus grande que 5 kg pour respecter la norme ISO pour les robots collaboratifs [36]. En somme, la plupart des manipulateurs ont des caractéristiques intéressantes, mais aucun n'est capable d'être intrinsèquement sécuritaire et d'atteindre les performances d'un bras robot industriel simultanément. Le tableau 3.1 présente les différentes spécifications qui ont été utilisées pour dimensionner le bras par rapport à des bras robots populaires. Le manipulateur MR a été conçu pour atteindre les spécifications des autres bras en termes de charge utile, de la plage des joints, de la portée et de la vitesse.

Tableau 2.1 Spécifications du robot manipulateur MR comparativement au WAM [16] et au UR5 [34].

Spécifications	Manipulateur MR	WAM	UR5
Charge utile (kg)	4.5	3	5
Masse en mouvement (kg)	5	7	18.4
Plage des joints (°)	$> \pm 180$	$> \pm 180$	± 360
Portée (m)	0.885	1	0.85
Vitesse (m/s)	1	3	1
Friction (% Couple Max)	< 10	-	-
Bande passante (Hz)	> 30	-	-
DDL	6	7	6
Prix (USD)	$< 35\ 000$	150 000	35 000
Resistance aux impacts	Grande	-	Faible

CHAPITRE 3

Article

3.1 Avant-propos

Auteur et affiliation

- **Mathieu Gervais** : Étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique, Groupe de recherche Créatek.
- **Louis-Philippe Lebel** : Étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique, Groupe de recherche Créatek.
- **Jean-Sébastien Plante** : Professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique, Groupe de recherche Créatek.

Date de soumission : 9 septembre 2021

Numéro de manuscrit : 21-2029

Revue : IEEE RA-L et ICRA 2022

Contribution au document : L'article présente une revue globale du projet présenté dans ce mémoire et des travaux qui ont été faits avec le manipulateur. Plus spécifiquement, l'article commence avec une introduction du sujet et une revue des différentes configurations et des types d'actionnement utilisés pour des robots collaboratifs. Ensuite, l'approche proposée pour pallier les limites des manipulateurs standard est présentée, puis les avantages de la configuration et de l'actionnement choisi pour le manipulateur sont démontrés. Les requis fonctionnels du bras sont présentés dans la même section. Il en suit une présentation sommaire de la conception du manipulateur et du choix des composants. Par la suite, la totalité des mesures qui ont été réalisées avec le manipulateur est présentée. Puis pour finir, un résumé des capacités du bras est fait et des travaux futurs sont proposés. En somme, l'article est un résumé concis du projet de recherche présenté dans ce mémoire.

3.2 Titre et Résumé français

Conception et validation expérimental d'un bras robotique actionnés par des embrayages magnétorhéologiques semi-délocalisés

Les bras collaboratifs doivent être robustes, rapides et forts tout en étant sécuritaires. Il est difficile, voire impossible pour un manipulateur robotique conventionnelle d’atteindre tous ces requis simultanément. La technologie d’actionnement magnétorhéologique (MR) est une alternative qui a le potentiel d’être sécuritaire et performante simultanément. Les actionneurs MR ont été utilisés avec succès dans des applications de collaboration homme-machine avec peu de degrés de liberté (< 2 DDL), mais le potentiel MR dans des applications de robotique avec plusieurs DDL reste à être exploré. Cet article présente un manipulateur de 6 DDL actionné par des embrayages MR semi-délocalisés. Le manipulateur a été conçu pour atteindre ou dépasser les performances des bras robots collaboratifs commerciaux dans le but de valider la capacité des actionneurs MR pour des applications en robotique collaborative. Les mesures expérimentales montrent que le bras a une masse en mouvement de seulement 5.3 kg et qu’il peut déplacer une masse de 4.5 kg à 1 m/s avec une portée de 0.885 m. De plus, la bande passante en force est au-dessus de 50 Hz et la friction des joints est de maximum 10 % du couple maximum du joint. Aussi, il est montré que le manipulateur est intrinsèquement sécuritaire et tolérant aux impacts. En somme, il est possible de dire qu’un actionnement MR semi-délocalisé est une solution prometteuse pour la robotique collaborative, mais des travaux futurs sont nécessaires pour que la technologie atteigne son plein potentiel en robotique.

3.3 Article

Design Exploration and Experimental Characterization of a 6 Degrees-of-Freedom Robotic Manipulator Powered by Cable-Driven Semi-Delocalized Magneto-rheological Actuators

3.4 Abstract

Collaborative robots need to work closely and safely with users while being fast and strong. Fulfilling both these needs simultaneously presents a significant challenge, if not a roadblock, for conventional geared motor technology. Magnetorheological (MR) actuation is an alternative technology that has the potential to exhibit both safety and speed at the same time in a compact and cost-effective envelope. MR actuation has demonstrated great potential for low-DOF mechatronic devices in close collaboration with humans such as exoskeletons and flight control systems but its potential for high-DOF collaborative robots remains widely unexplored. This paper presents the design and experimental validation of a 6 DOF manipulator prototype actuated by semi-delocalized MR clutches. The manipulator is designed with the objective of matching or exceeding the performance requirements of today’s cobots in order to verify the potential of MR actuation for such applications.

Experimental results show that the prototype has a mass in motion of 5.3 kg and can move a 4.5 kg payload at 1 m/s in a range of 0.885 m. Force bandwidth is above 50 Hz and backdriving forces less than 10% of the joints maximum torque, assuring excellent dynamic performance. Furthermore, the manipulator prototype is shown to be inherently safe and impact-tolerant. In all, results suggest that semi-delocalized MR actuation is a promising solution for high performance cobots although future work is needed for the MR technology to reach full-maturity in robotics.

3.5 Introduction

Industrial robots are now the standard in industry to accomplish repetitive and dangerous tasks while increasing productivity [1]. In most applications, industrial robots must be fast, strong and precise to move and position heavy components in space. Their implementation in assembly lines requires highly reliable safety features such as fences, physical or virtual, to prevent possible impacts with workers that could result in injuries or even death [2]. The biggest danger comes from the impact loads caused by the large effective inertia (or large effective impedance) of their actuators [3]. The dangerousness of a robot can be reduced by adding safety software and sensors, but even the most robust systems may react unexpectedly in the event of electrical, sensors, or software faults [4].

Meanwhile, the idea of flexible production lines and robotic co-workers where robots interact safely with workers to combine human and machine skills lies at the core of the next industrial revolution [1]. Like industrial robots, collaborative robots need to precisely control their position while moving at human-like speeds but they must do so while being intrinsically safe [4]. To be intrinsically safe, an *ideal* cobot should thus have a **low mass in motion** [36], use **low inertia actuators** with **fast reaction times** (high bandwidth), and have **backdriveable transmissions** with **minimum backlash** and **friction losses** [5], [6].

3.5.1 Background

Today, three main design paradigms are used for collaborative robots : 1) making robots as lightweight as possible, 2) delocalizing actuators, and 3) using Series Elastic Actuators (SEAs).

Lightweight robots aim to reduce moving mass by using small and lightweight highly geared actuators placed in a one-per-joint configuration on serial robots. In these designs, torque multiplication is achieved with ultra-compact transmissions, such as harmonic drives coupled with brushless motors [7]. Harmonic drives have low backlash [8], but suffers from high friction [9, 10], impeding their backdriveability [11] and thus, generally

limiting their maximum safe speed in collaborative applications [12]. Human-robot safety using harmonic drives can be increased with instrumentation such as force sensors, but the control stability range remains limited [13]. Moreover, harmonic drive lifetime reduces after each impact [14], complicating their practical use in close interactions with humans where frequent physical interactions and collisions are unavoidable.

Delocalizing actuators reduces moving mass by keeping heavy actuators in the robot's base and transferring motion from actuators to joints through belts or cables. Complex mechanical components, such as differentials, capstan drives and drive shafts are connected to transmit the power from base to the furthest DOF in the chain [15]. A robotic arm exhibiting the potential of delocalized actuation architecture is the 7 DOF robotic arm WAM. This robotic arm has zero backlash, low friction [16] and only weighs 7 kg over the shoulder [17]. To achieve zero backlash, capstan drives are used, requiring frequent maintenance due to cable stretching [18] which limits their practicality on production lines operating 24 hours per day, 7 days per week.

SEAs increase safety by adding a tuned-compliant element between a robot joint and its highly geared actuator to absorb collision energy during impacts [19]. However, adding a compliant element in the transmission limits the controllable actuation bandwidth [20]. To overcome this trade-off, Variable Stiffness Actuators (VSAs) are proposed where the stiffness of the elastic element is mechanically adjusted in real time depending on operating conditions [21, 22]. However, VSAs system remains a compromise and still cannot simultaneously exhibit high bandwidth actuation and safety at the same time.

Magnetorheological (MR) actuation has been explored as a potential alternative to the three previous design paradigms. MR actuations use a power source, such as an electric motor, and one or many MR clutches to finely transmit torque into the system's DOF [24]. MR clutches output rotors have significantly lower inertia than equivalent BLDC motors, are easily backdriveable and can easily be force controlled [25]. The fundamental advantage of MR actuation is that it decouples the inertia of the power source, e.g., motor and motor side gearing, from the actuated side of the system due to the magnetorheological fluid interface placed in between. The dynamic response of the whole actuation chain is then only affected by the inertia of the MR clutch output rotor and output gearing. Torque modulation is done by varying the magnetic field in the fluid, which in turn, vary its apparent yield stress. As no moving parts are in positive mechanical contact, MR clutches do not require high precision machining, making them low cost, reliable and inherently impact resistant. Recent studies have shown that the MR technology has a great potential in the most demanding human-machine interaction tasks such as wearable

robots [26], haptic robots [27], active vibrations control [28] [29], helicopter flight control [30] and exoskeletons [31]. To date, MR actuation has demonstrated usefulness in many mechatronics applications but not so much in robotics.

MR actuation in robotics has so far been studied on a 5-DOF manipulator for physical Human Robot Interactions (pHRI) [32]. The manipulator uses only one electric motor located into the arm’s base. Power is distributed to the joints by a series of belts, drive shafts and differentials to actuate 5 pairs of antagonistic MR clutches located at each of the arm’s joints in a direct-drive configuration (i.e., a 20 Nm MR clutch produces a 20 Nm joint torque). The use of MR clutches allows the arm to be backdriveable, but the overall mass and inertia remain high given that the direct-drive 20 Nm clutches weigh at least 1.8 kg. Thus, considering only the clutches the robotic manipulator weighs at least 18 kg for the MR actuators only, which is high compared to the 7 kg of mass in motion of the WAM [17] and comparable to the 18.4 kg of mass in motion of the UR5 [34].

Although MR actuation is a promising actuation alternative for high performance cobots, design architectures exploiting the unique characteristics of MR actuation leading to practical, lightweight and high torque cobots remain to be explored and developed.

3.5.2 Approach

This paper explores the potential of a cable-driven semi-delocalized 6 DOF robotic manipulator for lightweight and high torque cobots using MR actuation. The proposed configuration divides a traditional delocalized cable actuation system (see figure 3.1(a)) in multiple delocalized actuation sites (see figure 3.1(b)), each powered by its own motor and subset of MR clutches and cables. The proposed approach is a hybrid between a fully delocalized architecture and a one-per-joint architecture. This approach represents a best-of-both-world design exhibiting some of the lightweight benefits of delocalization and some of the simplicity benefits of a one-per-joint system.

The potential of the proposed semi-delocalized approach is assessed by verifying if a fully functional 6 DOF cobot prototype using the proposed architecture can meet design requirements extracted from today’s cobots gold standards. The design rationale for the prototype is first exposed. Then, the prototype is built and its performance is characterized in a laboratory test environment including a custom test bench with load cells to measure joints torques and bandwidths. Finally, conclusions are drawn with respect to the potential of the approach and future development challenges are identified.

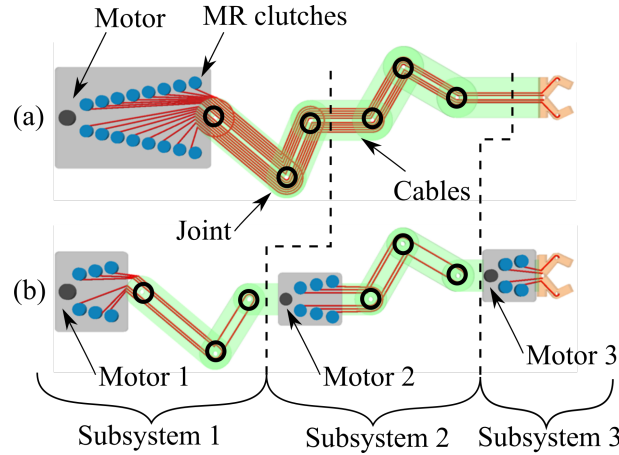


Figure 3.1 Delocalized and semi-delocalized actuation systems.

3.6 6 DOF Robotic Manipulator Design

3.6.1 Design Requirements

The robotic manipulator is designed to globally match the performance specifications of popular collaborative robots in terms of payload, mass in motion, range, reach, maximum speed, backdriving friction, bandwidth, number of DOFs, price range, and impact tolerance. Table 3.1 shows the targeted specifications extracted from known specifications of the WAM and UR5 robots.

Tableau 3.1 MR robotic Manipulator specifications compared to WAM [16] and UR5 [34].

Specifications	MR manipulator	WAM	UR5
Payload (kg)	4.5	3	5
Mass in motion (kg)	5	7	18.4
Joint range ($^{\circ}$)	$> \pm 180$	$> \pm 180$	± 360
Reach (m)	0.885	1	0.85
End effector speed (m/s)	1	3	1
Friction (% Max torque)	< 10	-	-
Force bandwidth (Hz)	> 30	-	-
DOF	6	7	6
Price (USD)	$< 35\ 000$	150 000	35 000
Impact resistance	High	-	Low

Data for backdriving friction and blocked force bandwidth are not available for the WAM and UR5. Based on our experience, a backdriving friction of less than 10% of the joint maximum torque is acceptable. Also, actuation bandwidth is set to be of at least 30 Hz to react faster than human motion [35].

Positioning precision is not assessed in this study since it is not expected to be a major technological roadblock for tasks involving close collaboration with humans such as fetching objects for operators or supporting weights. Indeed, cobots using SEA actuators with rather limited positioning precision (e.g. Rethink Robotics) were yet able to perform collaborative tasks.

3.6.2 Proposed Semi-Distributed Design

The proposed prototype is a combination of 2 subsystems : (1) a 3-DOF robotic arm and (2) a 3-DOF forearm (see figure 3.2). The motivation for this semi-distributed configuration is to find an optimal compromise between the complexity of delocalizing all 6 actuators and the high mass in motion of a serial arm. Each of the two subsystems uses an antagonistic configuration where 2 MR clutches are pulling on cables or belts to provide backlash-free, bi-directional torque control to each DOF.

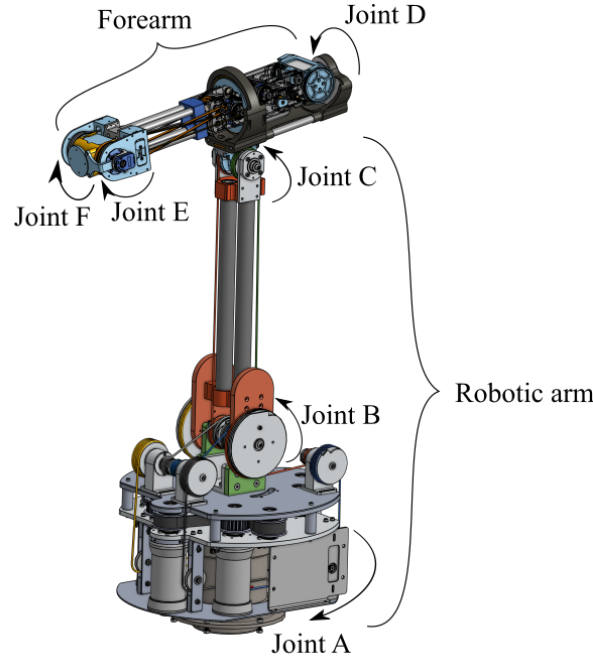


Figure 3.2 CAD of the proposed 6 DOF semi-delocalized robotic manipulator.

A cable transmission between the MR clutches and the joints allows the introduction of a gearing ratio by using pulleys of different diameters to reduce the torque and size of the clutches while maintaining good dynamic performance. The dynamics of a cable driven robotic manipulator moving a payload in space can be simplified as a "mass-spring-mass system" such that the first resonance frequency, beyond which the system is uncontrollable, can be estimated with :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (3.1)$$

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (3.2)$$

where k is the transmission stiffness, μ is the reduced mass, m_1 and m_2 are the rotor inertia in the reference frame of the transmission and the mass of the payload respectively [25]. The first resonance frequency is inversely proportional to the reduced mass and driven by actuator rotational inertia. For example, for a same actuator torque (0.365 N m versus 0.4 N m), the actuator rotational inertia of WAM-type brushless motors is more than ≈ 50 times bigger than the MR clutches used in this paper ($1.472 * 10^{-5}$ kg m² versus $2.8 * 10^{-7}$ kg m²) [33]. This means that for the same transmission stiffness and a 5 kg payload, the first resonance mode of joints actuated by MR clutches would be at least 7 times higher than joints actuated with brushless motors.

The global design requirements for the 6 DOF robotic manipulator defined in table 3.1 are translated into joint requirements in table 3.2 for both the arm and forearm subsystems. Clutch ratios are the transmission ratios between the clutches output and the joints, while motor ratios are the transmission ratios between the driving motors and the clutches input. The design of each subsystem is detailed in the next two sections.

Tableau 3.2 6 DOF Robotic manipulator performance.

Joints	Torque (Nm)	Speed (Deg/S)	Range (°)	Clutch Ratios	Motor Ratios
Arm					
Joint A	25	600	± 135	4	10
Joint B	50	300	± 130	8	10
Joint C	25	600	± 90	4	10
Forearm					
Joint D	10	250	± 180	24	10
Joint E	10	250	± 90	24	10
Joint F	10	250	± 360	24	10

3.6.3 3 DOF Robotic Arm Design

The robotic arm consists of the 3 proximal joints A, B and C (see fig 3.3). The actuation module rotates along with joint A (see fig 3.4). The clutches and motor are placed as near as possible to the rotation axis of joint A to keep the effective inertia as low as possible. The structure of the 3-DOF arm is an assembly of stock carbon fiber tubes and aluminum parts.

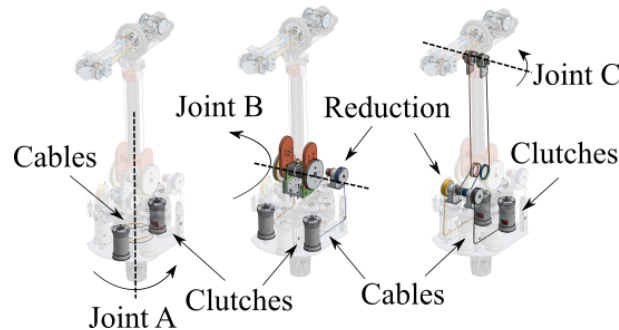


Figure 3.3 Detailed presentation of the arm actuation.

Cable transmissions are used to transfer power from the clutches to the joints (see fig 3.3). Cables go through redirection and ratio multiplying ball bearing pulleys to achieve the required torque at joints. Carl Stahl 2.38 mm 7X49 steel cables wrapped in a nylon shield are selected for their excellent diameter to bend radius ratio. Typical cable drives face the challenges of cable stretch and cable fatigue. Cable stretch is not a relevant issue in the proposed design since the MR clutch pulleys are antagonists and fundamentally controlled in torque such that cable stretch is automatically compensated by reeling stretched cable on the winding pulleys. Cable fatigue, however, remains a design issue and is addressed by carefully following manufacturer design guidelines [37]. A safe fatigue life of over 1M cycles is expected.

The 3 DOF robotic arm is powered by a 1.2 kW Kollmorgen AKM43L which has a rated speed of 3000 RPM. A Gates GT3 15 mm width double sided belt is used to transfer power from the motor to the clutches (see fig 3.4).

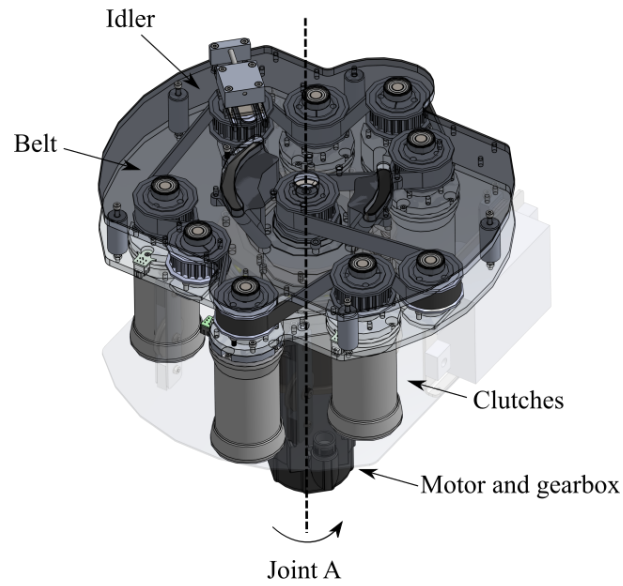


Figure 3.4 Detailed presentation of the arm actuation module.

3.6.4 3 DOF Forearm Design

The forearm consists of the 3 distal joints D, E and F (see fig 3.5). The actuation module is designed to rotate around joint D. To reduce the inertia of the forearm seen by joint C, the actuation module is placed at one extremity of the forearm so that the center of gravity of the forearm is the nearest possible of the rotation axis of joint C. The structure of the forearm is an assembly of aluminum parts and 3D printed parts in Onyx by Markforged to develop a first functional prototype.

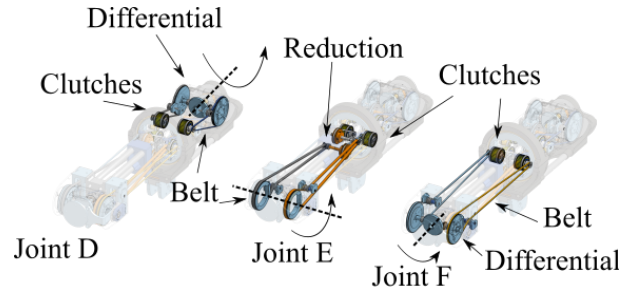


Figure 3.5 Detailed presentation of the forearm actuation.

An arrangement of belts and differentials are used to transfer power from the clutches to the joints. Since the Forearm requires higher clutch ratios than the Robot Arm (see table 3.2) to minimize the moving mass, belts are here preferred over cables as they allow a simpler and more compact, ratio multiplying, arrangement. Two stages of Gates GT3 belts 3 mm and 6 mm width are used for joint E while Gates GT3 belts 3 mm width and bevel gears are used for joints D and F (see fig 3.5). Here again, backlash from timing belts and bevel gears is eliminated by the antagonist operation of MR clutches keeping a constant preload on the system. The motor is a 100 W Faulhaber 4221 with a rated speed of 6000 RPM (see fig 3.6).

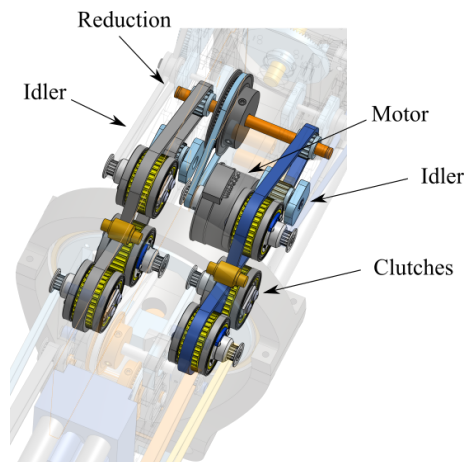


Figure 3.6 Detailed presentation of the forearm actuation module.

3.6.5 MR Actuation

The MR clutches of robotic arm and the forearm are both based on a drum configuration (e.g., see the forearm clutch in fig 3.7) for ease of fabrication and assembly. A non-rotating coil controls the yield stress of the MR fluid through an air-gap. Table 3.3 shows torque, output rotor inertia, mass and size of the clutches used.

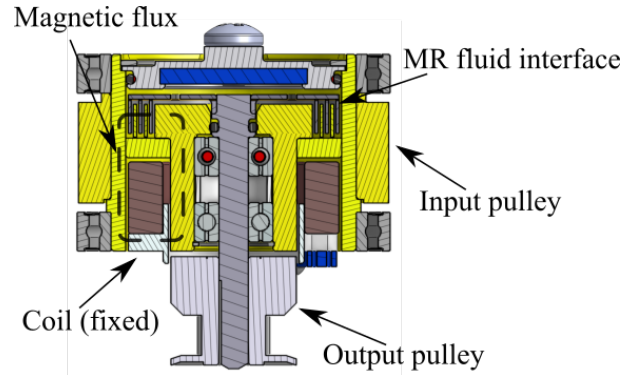


Figure 3.7 Detailed presentation of the forearm clutch.

Tableau 3.3 Clutches specifications.

Clutches	Torque (Nm)	Output Inertia (kg*m ²)	Mass (g)	Size (mm)
Arm	6.5	$2.4 * 10^{-4}$	410	50 x 67
Forearm	0.4	$2.8 * 10^{-7}$	90	32 x 20

3.7 Experimentation and Results

The total weights of the arm and forearm are 85 kg and 3.5 kg respectively. While the total weight is high, the moving mass is of only 5.3 kg (2.8 kg of the arm and 3.5 kg forearm). It should be noted that the base is purposely beefy since the manipulator must remain stable (e.g., no tipping) even under full loads at the end-effector. Significant weight savings can be made if the robot base is fixed. The maximum speed measured at the end-effector is beyond 3 m/s.

3.7.1 Torque and Frequency Response

The maximum torque output and blocked force bandwidth of each joint are measured with a static ATI mini45 multi-axis load cell mounted on a steel frame (see fig 3.8).

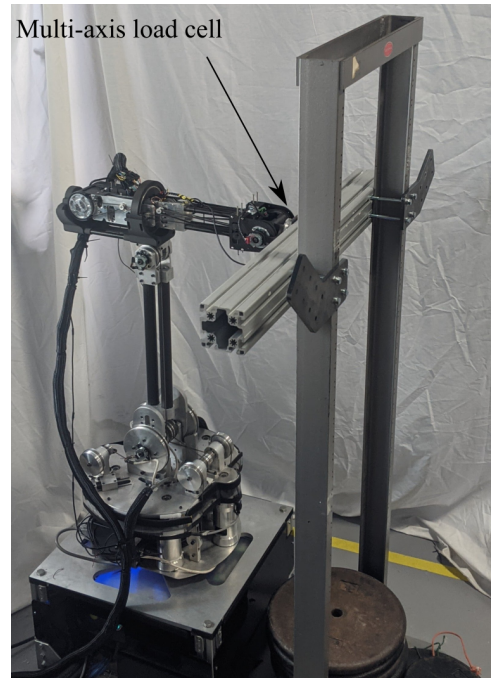


Figure 3.8 Manipulator static bench tests.

3 DOF Arm Results

During the tests, the motor drives the clutches at a constant speed of 200 RPM. For each joint, a ramped current from 0 A to 5 A is sent in each antagonist clutch to evaluate the torque range. Bandwidth is evaluated with a 1 A amplitude chirp current varying from 0.1 to 200 Hz. As shown in figure 3.9, the arm's joints reach at least 70% of the specified torque. Also, figure 3.9 shows that joint torque bandwidth is limited by the system resonance at around 60 Hz.

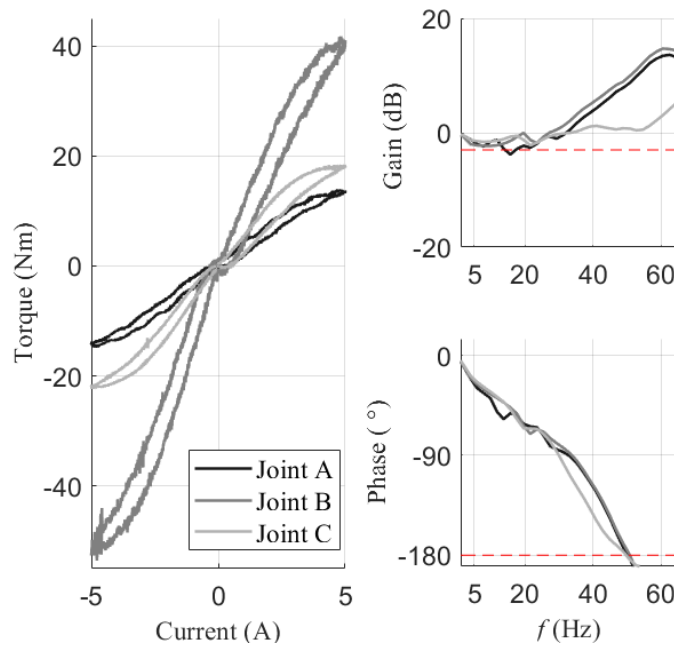


Figure 3.9 Arm joint A, B and C torque range and frequency response measures.

3 DOF Forearm Results

The same tests are done on the forearm. For each joint, a ramped current from 0 A to 10 A is sent in each antagonist clutch to evaluate the torque range while the motor drives the clutches at a constant speed of 2000 RPM. Higher current is here required due to the coil design used for the forearm MR clutches. The bandwidth is evaluated with a 1 A amplitude chirp signal varying from 0.1 to 200 Hz. Figure 3.10 shows that the forearm has a similar behavior to the arm. The joints have reached between 50% and 90% of the 10 Nm specify torque. For the frequency response, the system resonance limiting the bandwidth is observed at around 50 Hz.

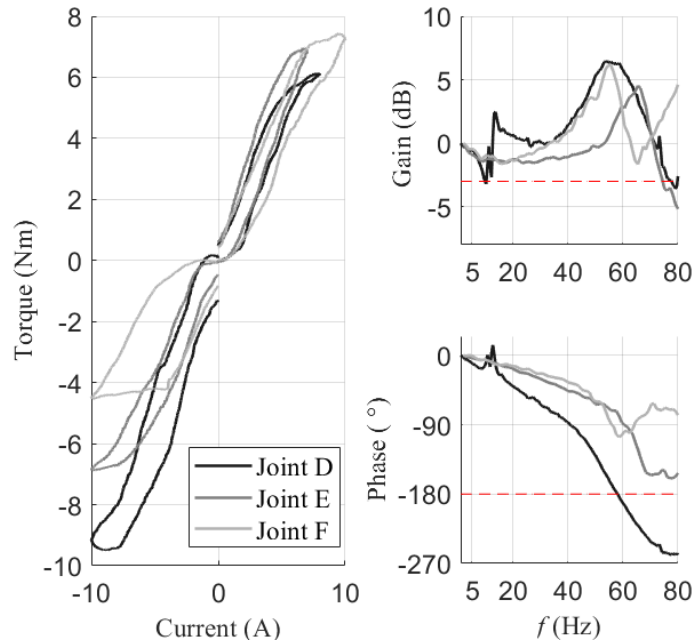


Figure 3.10 Forearm joint D, E and F torque range and frequency response measures.

Discussion

Two observations stand out from experimental measurements : First, the measured joint torques are lower than expected, showing a 10% to 50% reduction. The discrepancy is most likely due to variations in the fluid volume and/or iron particle concentration since filling small clutches is sensitive to air bubbles as the volume occupied by possible air bubbles as a great effect on overall clutch performance compared to large clutches. Second, the results confirm high first resonances of 50 Hz and 60 Hz. The results also show disturbances around 20 Hz. These resonances are most likely due to the lack of rigidity of the structure made of aluminum and 3D printed parts and/or the test rig itself.

3.7.2 MR Clutches and Transmission Friction Forces

Friction forces of each joint are measured with an ATI mini45 load cell mounted on a handle at the end effector. The handle is manually moved in space to backdrive each joint one at a time. For the forearm, a Coulomb friction of ≈ 0.75 Nm and damping of ≈ 0.007 Nm/(Deg/s) are measured and each joint of the forearm behaved the same way. The Coulomb friction and the damping come mainly from clutch's seal and MR fluid respectively. However, the arm's joints have less predictable behavior and making a direct correlation between friction and speed is not possible. The maximum friction torque measured for the arm is ≈ 0.7 Nm which is 1.4% of the maximum joint torque.

3.7.3 Impact Resistance and Safety

The robotic arm has struck a thick heavy steel plate more than 200 times at an end-effector speed of 1 m/s generating loads of about 100 N (see fig 3.11). This test was done with the arm only since the forearm was not fabricated at the time of testing. Impacts have not affected the robotic arm structural integrity in any way. The sturdiness comes from the fact that the MR clutches are always slipping, acting as a natural mechanical fuse upon impacts since sudden speed variations of the output rotor only transfer viscous friction loads, which are small, to the input rotor. Two identical 3 DOF robotic arms have been used regularly since 2018 without any failure, service, or apparent sign of performance degradation.

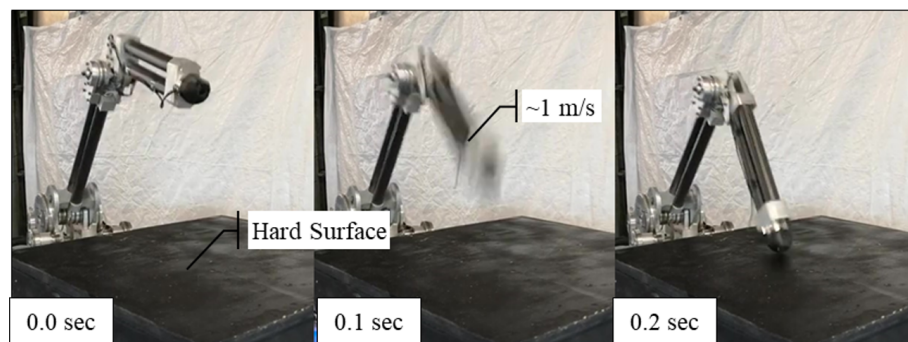


Figure 3.11 Impact resistance tests.

On a safety perspective, such low impact forces at 1 m/s on “infinitely” rigid surfaces guarantees the inherent safety of the approach since 100 N loads are under maximum tolerable loads for a safe impact between a human and a robot [36]. Higher safe speeds are even possible. An in-depth study of robot speed and safety is complex and left for future work.

3.7.4 Costs

Pricing estimates are highly subjective, but it can be said that the proposed semi-delocalized MR-powered cobot has the potential to be manufactured at lower costs than today’s alternatives relying on harmonic drives. Indeed, the prototype is entirely made from off-the-shelf components and simple MR clutches that do not require any high precision machining or expensive materials. For example, one harmonic drive cost $\approx 1\,000$ \$ [38] while two MR clutches, a motor and transmission could cost on the order of ≈ 500 \$.

3.8 Discussion, Conclusion and Perspective

Table 3.4 sum-up the ability of the 6 DOF manipulator prototype powered by semi delocalized MR actuators to meet state-of-the art design requirements.

Tableau 3.4 Targeted specifications of the MR robotic arm compare to those measured, WAM [16] and UR5 [34].

Specifications	Targeted	Measured	WAM	UR5
Payload (kg)	4.5	4.5	3	5
Mass in motion (kg)	5	5.2	7	18.4
Joint range ($^{\circ}$)	$> \pm 180$	$> \pm 180$	$> \pm 180$	± 360
Reach (m)	0.885	0.885	1	0.85
End effector speed (m/s)	1	1	3	1
Friction (% Max torque)	< 10	10	-	-
Force bandwidth (Hz)	> 30	50	-	-
DOF	6	6	7	6
Price (USD)	$< 35\,000$	$\approx 35\,000$	150 000	35 000
Impact resistance	High	High	-	Low

The following design observations can be made regarding the ability of the arm to meet best in class cobots design requirements :

- The 6 DOF robotic manipulator matches market relevant specifications of commercial cobots with a payload of 4.5 kg, a reach of 0.885 m and a safe speed of at least 1 m/s (maximum speed is beyond 3 m/s). In practice, the 1 m/s safe speed is a significant improvement over existing cobots using harmonic drives (e.g. UR5) since these designs must slow down under 1 m/s to guarantee safety [12].
- The robotic manipulator’s mass in motion is only 5.3 kg, which is at least 4 time lower than the mass in motion of the MR manipulator pHRI [32].
- The bandwidth is limited by a first resonance at 50 Hz which is higher than the target of 30 Hz, thereby demonstrating fast dynamics.

-
- The backdriving torque of the arm represents 1.4% of the joint torque while the forearm maximum backdriving torque represents 10% of the joint torque, on the limit with the target.
 - The robotic manipulator is designed with simple and low-cost-components, is tolerant to impacts, and insensitive to cable stretch.

In all, it can be concluded that the semi-delocalized MR actuation technology has the potential of delivering best in class dynamic performance in a cost effective and practical package that is inherently safe and tolerant to impacts. The proposed approach can help deploy cobots not only in the manufacturing world but to all other applications requiring human-like machine interaction. An example of such an application is shown in figure 3.12 where the Robot Arm of this project is combined with a haptic glove to provide full VR tactile environment in video games.

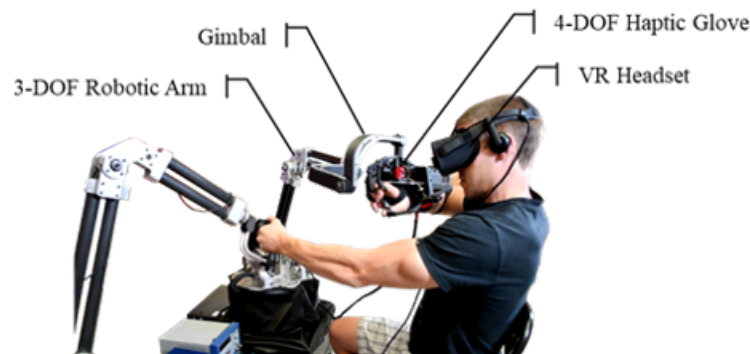


Figure 3.12 Arm and haptic glove VR system.

The following limitations and challenges remain to be addressed in future work :

- The semi-delocalized MR actuation approach presented here is only one of many possible others, such as for example, using one motor and two MR clutches directly at each joint. Such other approaches remain to be explored and characterized experimentally before a full understanding of the MR technology in robotics can be made.
- Experiments showed that the arm joints reached at least 70% of the 25-50 Nm specify torque while the forearm joints reached between 50 and 90% of the 10 Nm specify torque. Proper MR clutch filling is critical and must be carefully controlled, particularly in systems using multiple small clutches.
- Even if blocked force bandwidth is sufficient, structural rigidity should be further improved, especially in the forearm parts to increase resonance frequencies as much as possible.

-
- Robotic manipulator volume should be reduced with better packaging and integration. Better manufacturing methods such as molding of dedicated carbon fiber components and 3D printing of functional parts should be investigated.
 - Positioning precision, impact detection and reaction, as well as safety of collision should be characterized in-depth.

ACKNOWLEDGMENT

Special thanks to Dominic Baril, Pierre-Olivier Brochu, Jonathan Gauthier, Raphaël Guérette, Béatrice Laroche, Louis-Philippe Lebel, Richard Naud, Nicolas Potier, Pierre-Olivier Reneault and Patrick Vignis for the design and the assembly of the robotic arm, Exonetik for the help in the design of the manipulator and the financing and Benjamin Bedard for the design and the assembly of the haptic glove.

CHAPITRE 4

CONCLUSION

4.1 Sommaire

L'objectif du projet est d'évaluer la performance d'un robot manipulateur actionné par des embrayages MR délocalisés. Pour se faire, une étude approfondie des bras robots collaboratifs a été réalisée pour connaître les performances que doit atteindre le bras tout en restant sécuritaire. La conception du bras a été faite en considérant que le frottement et le jeu de la transmission doivent être le plus faibles possible tout en ayant une grande bande passante en force et une faible masse en mouvement. De plus, le manipulateur est conçu avec des composants simples, peu dispendieux et accessibles. La performance du manipulateur a été évaluée en mesurant le couple, le frottement et la bande passante de chacun des joints.

L'évaluation expérimentale a permis de valider les spécifications suivantes :

- Le bras robot a une masse en mouvement de seulement 5.3 kg.
- Les joints du bras ont atteint au moins 70 % des couples spécifiés de 25 Nm et 50 Nm.
- Les joints de l'avant-bras ont atteint entre 50 % et 90 % du couple spécifié de 10 Nm.
- La bande passante est limitée par une résonance à 50 Hz.
- La force de rétro actionnement est équivalente à 1.4 % du couple maximum pour les joints du bras et 10 % pour les joints de l'avant-bras.

L'analyse expérimentale démontre que le premier bras robot 6 DDL actionné par des embrayages semi-délocalisés est prometteur pour des applications en robotique collaborative. Sans optimisation majeure, le bras est capable d'atteindre les spécifications des bras robots collaboratifs en termes de charge utile, d'amplitude de mouvement et de vitesses tout en ayant une faible masse et une grande bande passante.

4.2 Perspectives et travaux futurs

Plusieurs aspects pourraient être réévalués et retravaillés pour améliorer la performance du bras robot. Les faits suivants sont les plus marquants :

-
- La rigidité du manipulateur et du banc de test pourrait être améliorée malgré le fait que la bande passante soit suffisante. D'autres méthodes de fabrication comme le moulage de pièces de carbone pourraient être évaluées pour rendre l'assemblage plus rigide.
 - La conception du manipulateur pourrait être revue pour le rendre plus compact, éliminer les bordures tranchantes et protéger les pièces en rotation.
 - Un contrôleur simple a été développé pour que le bras puisse tenir une position et suivre des trajectoires. Le contrôleur doit être élaboré et de nouvelles acquisitions expérimentales doivent être faites pour montrer que le manipulateur est capable d'être précis.

Enfin, le bras possède des capacités intéressantes comme bras robot collaboratif. Il serait pertinent d'évaluer si le même manipulateur a les capacités d'être un bon appareil haptique en utilisant des mesures expérimentales appropriées.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] K. D. Thoben, S. Wiesner and T. Wuest, "“Industrie 4.0” and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples," *International Journal of Automation Technology*, vol. 11, pp. 4–9, 2017.
- [2] S. Robla-Gómez, V. M. Becerra, J. R. Llata, E. González-Sarabia, C. Torre-Ferrero, and J. Pérez-Oria, "Working Together : A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments," *IEEE ACCES*, vol. 5, pp. 26 754–26 773, 2017.
- [3] M. Zinn, O. Khatib, B. Roth, and J. K. Salisbury, "Playing it safe [human-friendly robots]," *IEEE Robotics Automation Magazine* , vol. 11, no. 2, pp. 12–21, Jun. 2004.
- [4] M. Zinn, B. Roth, O. Khatib, and J. K. Salisbury, "A New Actuation Approach for Human Friendly Robot Design," *The International Journal of Robotics Research* , vol. 23, no. 4–5, pp. 379–398, Apr. 2004,
- [5] J. M. Hollerbach, I. W. Hunter, and J. Ballantyne, "A Comparative Analysis of Actuator Technologies for Robotics," *The Robotics Review 2*, Cambridge, MA, USA : MIT Press, 1992, pp. 299–342.
- [6] Schempf, H., and Yoerger, D. R. 1993. "Study of dominant performance characteristics", *robot transmissions. J. Mech. Design* , Trans. ASME 115 :472-482.
- [7] DLR, "History of the DLR LWR", [Online]. Available : https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-12464/21732_read-44586/
- [8] P. L. García, S. Crispel, E. Saerens, T. Verstraten, and D. Lefeber, "Compact Gearboxes for Modern Robotics : A Review," *Robotics and AI* , vol. 7, 2020.
- [9] P. Folega, "The study of the dynamic properties of some structural components of harmonic drive," *Journal of Vibroengineering*, vol. 15, [4] no. 4, pp. 2096–2102, 2013.
- [10] T. Tuttle and W. Seering, "A nonlinear model of a harmonic drive gear transmission," *IEEE Transactions on Robotics and Automation* , vol. 12, no. 3, pp. 368–374, 1996.
- [11] N. M. Kircanski and A. A. Goldenberg, "An Experimental Study of Nonlinear Stiffness, Hysteresis, and Friction Effects in Robot Joints with Harmonic Drives and Torque Sensors :," *The International Journal of Robotics Research* , 1997.
- [12] T. Hull et M. A. Minarcin, "Considerations in Collaborative Robot System Designs and Safeguarding" *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, vol. 9, no 3, p. 545-551, août 2016, doi : 10.4271/2016-01-0340.

-
- [13] H. Kazerooni, "Instrumented harmonic drives for robotic compliant maneuvers," *1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*, Apr. 1991, pp. 2274–2279 vol.3.
- [14] D. C. Hofmann, "Castable Bulk Metallic Glass Strain Wave Gears : Towards Decreasing the Cost of High-Performance Robotics," *Scientific Reports*, vol. 6, no. 1, p. 37773, Nov. 2016.
- [15] Y.-J. Kim, "Anthropomorphic Low-Inertia High-Stiffness Manipulator for High-Speed Safe Interaction," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 6, pp. 1358–1374, Dec. 2017.
- [16] Barrett, "WAM arm data sheet", [Online]. Available : https://web.barrett.com/files/WAMDataSheet_02.2011.pdf
- [17] Barrett, " WAM arm inertial specifications", [Online]. Available : https://web.barrett.com/support/WAM_Documentation/WAM_InertialSpecifications_AC-02.pdf
- [18] Barrett, "WAM Auto-Tensioning Procedure", [Online]. Available : <https://support.barrett.com/wiki/WAM/Autotensioning>
- [19] H.-S. Kim, I.-M. Kim, C.-N. Cho, et J.-B. Song, "Safe joint module for safe robot arm based on passive and active compliance method ", *Mechatronics*, vol. 22, no 7, p. 1023-1030, oct. 2012
- [20] J. W. Hurst, A. A. Rizzi, and D. Hobbelen, "Series Elastic Actuation : Potential and Pitfalls," *International Conference on Climbing and Walking Robots*, 2004.
- [21] A. Bicchi, G. Tonietti, M. Bavaro, and M. Piccigallo, "Variable Stiffness Actuators for Fast and Safe Motion Control," *Robotics Research. The Eleventh International Symposium, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics*, P. Dario and R. Chatila, Eds. Berlin, Heidelberg : Springer, 2005, pp. 527–536.
- [22] G. Tonietti, R. Schiavi, and A. Bicchi, "Design and Control of a Variable Stiffness Actuator for Safe and Fast Physical Human/Robot Interaction," *2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Apr. 2005, pp. 526–531.
- [23] Olena, Hryshaienko Lugo Calles, Jesus Hiram. (2019). Designing of a biphasic variable stiffness actuator for driving the 2-DOF anthropomorphic arm.
- [24] N. Najmaei, A. Asadian, M. R. Kermani and R. V. Patel, "Design and Performance Evaluation of a Prototype MRF-Based Haptic Interface for Medical Applications," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21, no. 1, pp. 110-121, Feb. 2016, doi : 10.1109/TMECH.2015.2429140.
-

-
- [25] J. Viau, P. Chouinard, J. P. L. Bigue, G. Julio, F. Michaud, and J. S. Plante, "Tendon-Driven Manipulator Actuated by Magneto- Rheological Clutches Exhibiting Both High-Power and Soft Motion Capabilities," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* , vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2016.
- [26] C. Veronneau, J. Denis, L.-P. Lebel, M. Denninger, V. Blanchard, A. Girard, and J.-S. Plante, "Multifunctional Remotely Actuated 3- DOF Supernumerary Robotic Arm Based on Magnetorheological Clutches and Hydrostatic Transmission Lines," *IEEE Robotics and Automation Letters* , pp. 1–1, 2020.
- [27] L.-P. Lebel, B.-P. Busque, G. Julio, M. Denninger, A. Girard, and S. Plante, "A cable-driven robotic arm powered by magnetorheological clutches for upper-limbs physical interaction in virtual reality environment," *Workshop ICRA 2019*, p. 4.
- [28] East W, Turcotte J, Plante J-S, Julio G. "Experimental assessment of a linear actuator driven by magnetorheological clutches for automotive active suspensions", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2021 ;32(9) :955-970. doi :10.1177/1045389X21991237
- [29] M. Bégin et al., "Experimental Assessment of a Controlled Slippage Magnetorheological Actuator for Active Seat Suspensions," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 4, pp. 1800-1810, Aug. 2018, doi : 10.1109/TMECH.2018.2836351.
- [30] P. Chouinard, M. Denninger and J. Plante, "Reliable and lightweight primary flight control actuation using magneto-rheological clutches in slippage," *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2015, pp. 213-219, doi : 10.1109/ICRA.2015.7139002.
- [31] C. Khazoom, C. Véronneau, J. L. Bigué, J. Grenier, A. Girard and J. Plante, "Design and Control of a Multifunctional Ankle Exoskeleton Powered by Magnetorheological Actuators to Assist Walking, Jumping, and Landing," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 3083-3090, July 2019
- [32] S. Pisetskiy and M. R. Kermani, "Compliant 5-DOF Robot : Mechanical Design," p. 7, 2019.
- [33] Barrett, "WAM Specifications : Motors, Materials, Power", [Online]. Available : <https://support.barrett.com/wiki/WAM/Specifications%3AMotorsMaterialsPower>
- [34] Universal robot, "UR5 Technical specifications", [Online]. Available : https://www.universal-robots.com/media/50588/ur5_en.pdf
- [35] S. R. Ellis, "What are virtual environments?" *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 14, no. 1, pp. 17–22, Jan. 1994.
-

-
- [36] ISO/TS 15066 :2016, Robots and robotic devices Collaborative robots,ISO, Geneva (2016).
- [37] carl stahl, "Design guide for cable solutions",[Online]. Available : <https://carlstahl.fi/media/wysiwyg/pdf/SavaUsaTuoteluettelo.pdf>
- [38] Radwell, "Industrial solutions",[Online]. Available : <https://www.radwell.ca/en-CA/>