

Micromanipulateur à 7 DDL

Laboratoire : Institut FEMTO-ST

Contact : Redwan Dahmouche, redwan.dahmouche@femto-st.fr
Maître de conférences à l'Université de Franche-Comté

Résumé

Le dispositif proposé est le premier robot parallèle intégrant la fonction de préhension, en plus des six mobilités de manipulation (trois rotations et trois translations), d'où son nom *micromanipulateur à 7 DDL* (degrés de liberté). Sa structure cinématique ainsi qu'une variante à 4 DDL ont été brevetées en 2018. Les mouvements en translation et en rotation ainsi que la fermeture de l'organe terminal (une pince par exemple) sont commandés par les déplacements de huit actionneurs fixés à la base du robot. Cette disposition permet une grande dextérité de mouvement dans un volume extrêmement compact.

« This work is of great importance at the near-future field of the fabrication of microrobotics »
Relecteur du *Journal of Micromechanics and Microengineering* [4]

Le micromanipulateur à 7 DDL est destiné : (1) au domaine industriel pour manipuler rapidement des produits ou composants de faibles dimensions, (2) au domaine médical pour réaliser des instruments chirurgicaux mini-invasifs, (3) aux applications présentant des contraintes fortes d'encombrement comme la manipulation dans un microscope électronique à balayage (MEB) ou autres stations de nanomanipulation. Trois démonstrateurs ont été réalisés pour valider le concept avec différentes technologies et différentes dimensions, le plus petit démonstrateur mesurant 1 cm^3 , ce qui en fait également le plus petit robot au monde ayant 7 DDL !

Introduction

Depuis l'invention du robot Delta par Reymond Clavel en 1985, les robots parallèles ont rencontré un énorme succès industriel notamment pour les opérations de prise-dépose. Ils sont caractérisés par plusieurs chaînes cinématiques fermées connectées de leur base à une plateforme terminale. Par rapport aux robots sériels, les structures parallèles ont une plus grande rigidité et offrent la possibilité de déporter les actionneurs sur la base du robot permettant d'alléger les parties en mouvement. Les masses transportables par le robot sont ainsi plus importantes et les accélérations plus fortes, ce qui est particulièrement intéressant pour les tâches de prise-dépose rapides. Ils sont également utilisés pour manipuler des charges lourdes, dans les simulateurs de vol par exemple. Dans le cadre de la micromanipulation, les robots parallèles permettent également d'atteindre de grandes précisions de positionnement mais nécessitent l'ajout d'un préhenseur ou d'un outil adapté sur leur organe terminal (partie mobile).

Le micromanipulateur à 7 DDL (degrés de liberté), présenté ici, est un robot parallèle à sept degrés de liberté permettant la manipulation dans l'espace et la préhension sans nécessité d'ajouter un outil sur l'organe terminal. La fonctionnalité de préhension est assurée par la plateforme articulée, qui fait partie de l'architecture mécanique elle-même, et peut être entièrement contrôlée par les actionneurs déportés situés sur la base du robot. Cette disposition permet une grande dextérité de mouvement dans un volume extrêmement compact.

Principe de fonctionnement

La structure du micromanipulateur comprend huit actionneurs (translatifs ou rotatifs) reliés à une plateforme articulée par huit biellettes (ou jambes). La plateforme articulée est capable de se plier pour permettre la réalisation de tâches diverses comme la saisie (pince) ou la découpe (ciseaux) sans actionneur supplémentaire. Les deux parties de la plateforme sont connectées chacune à quatre actionneurs par l'intermédiaire de quatre biellettes comportant une rotule à chacune de leurs extrémités. L'ensemble est agencé de façon à ce que les positions et les orientations de la plateforme dans l'espace, ainsi que la distance et/ou l'angle entre ses deux parties mobiles puissent être commandés par les mouvements des actionneurs. Cette nouvelle solution permet simultanément de réaliser des opérations de préhension (un degré de liberté) et de manipulation (six degrés de liberté) sans avoir besoin d'un outil supplémentaire placé sur la plateforme.

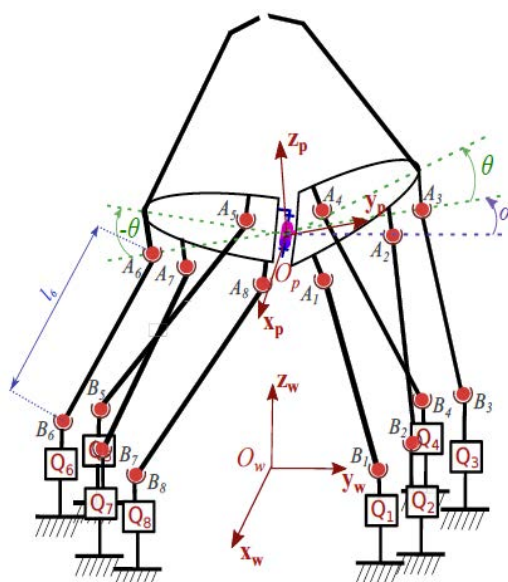


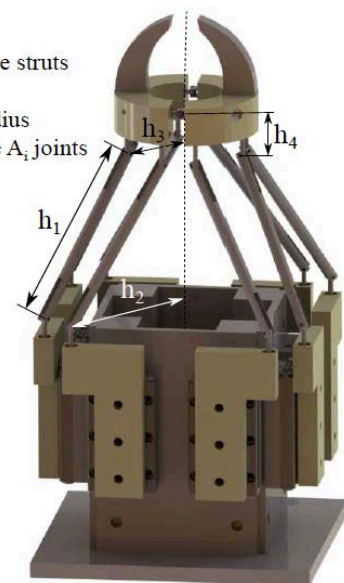
Schéma cinématique du micromanipulateur

h_1 : Length of the struts

h_2 : Base radius

h_3 : Platform radius

h_4 : Offset of the A_i joints



Exemple de réalisation possible

L'utilisation de huit actionneurs a été retenue pour des raisons d'équilibrage et de symétrie de la structure mais également afin d'obtenir plus de degrés de liberté au niveau de la plateforme, et/ou des redondances d'actionnement et/ou de mesures supplémentaires. Un robot redondant en actionnement permet d'augmenter l'espace de travail, de limiter la présence des singularités cinématiques, de contrôler les contraintes internes dans la chaîne cinématique du dispositif, d'augmenter les forces et couples transmises aux éléments mobiles, ainsi que leurs vitesses et accélérations.

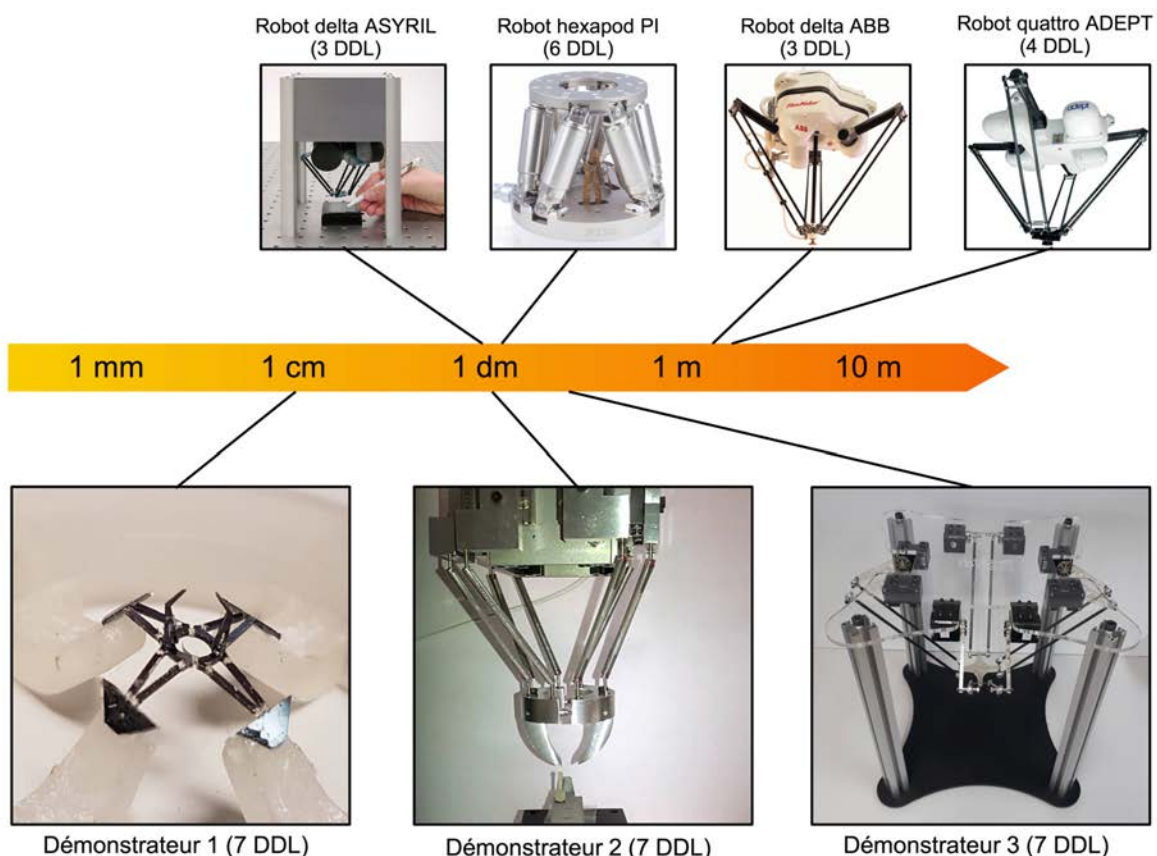
Dans les démonstrateurs réalisés, les actionneurs et les biellettes sont disposés de façon symétrique. Un robot symétrique permet d'homogénéiser les dimensions des pièces, simplifier la conception, la modélisation, la fabrication et la commande du dispositif. Les parties fixes des actionneurs sont rigidement liées à un élément de base, permettant d'alléger les parties mobiles du dispositif. Cela se traduit par un gain en vitesse, en accélération et en efforts applicables. Enfin, les liaisons mécaniques (pivot, rotule, cardan, etc.) peuvent être remplacées par des liaisons flexibles. Cette solution facilite la fabrication du dispositif à une échelle miniaturisée (voir démonstrateur 1) et permet d'éliminer les jeux pouvant exister dans les liaisons conventionnelles (qui sont sources de dégradation de la répétabilité du manipulateur).

Démonstrateurs

Trois démonstrateurs ont permis de valider les différentes variantes du concept et d'en évaluer certaines performances. Ils ont été réalisés avec plusieurs technologies et selon trois tailles pour couvrir un large champ d'applications possibles.

1. Le premier démonstrateur mesure une dizaine de millimètres de côté, ce qui en fait le plus petit robot au monde ayant 7 degrés de liberté ! Sa structure a été fabriquée à l'aide de d'un nouveau procédé qui a fait l'objet d'une publication dans *Journal of Micromechanics and Microengineering* [4]. Ce procédé permet d'intégrer des éléments en élastomère dans une structure silicium réalisée en salle blanche. Les articulations sont donc élastiques, ce qui permet de supprimer les jeux mécaniques et les frottements secs. La structure du robot est reliée à quatre tables de positionnement XY.
2. Le deuxième démonstrateur atteint une dizaine de centimètres de côté. Il est réalisé par un assemblage de pièces en aluminium. Ce démonstrateur est équipé de huit actionneurs linéaires et de rotules en rubis limitant les jeux mécaniques. Comme le montre la séquence vidéo jointe, il permet de manipuler des objets millimétriques dans un espace de travail d'une vingtaine de cm³.
3. Le troisième démonstrateur mesure une quarantaine de centimètres de côté. Il a été conçu à l'aide de tubes en fibres de carbone pour alléger la structure, de rotules métalliques conventionnelles et de pièces réalisées en prototypage rapide. Il est équipé d'actionneurs rotatifs pour simplifier la réalisation et illustrer les performances en vitesse du robot. Son espace de travail atteint une dizaine de dm³.

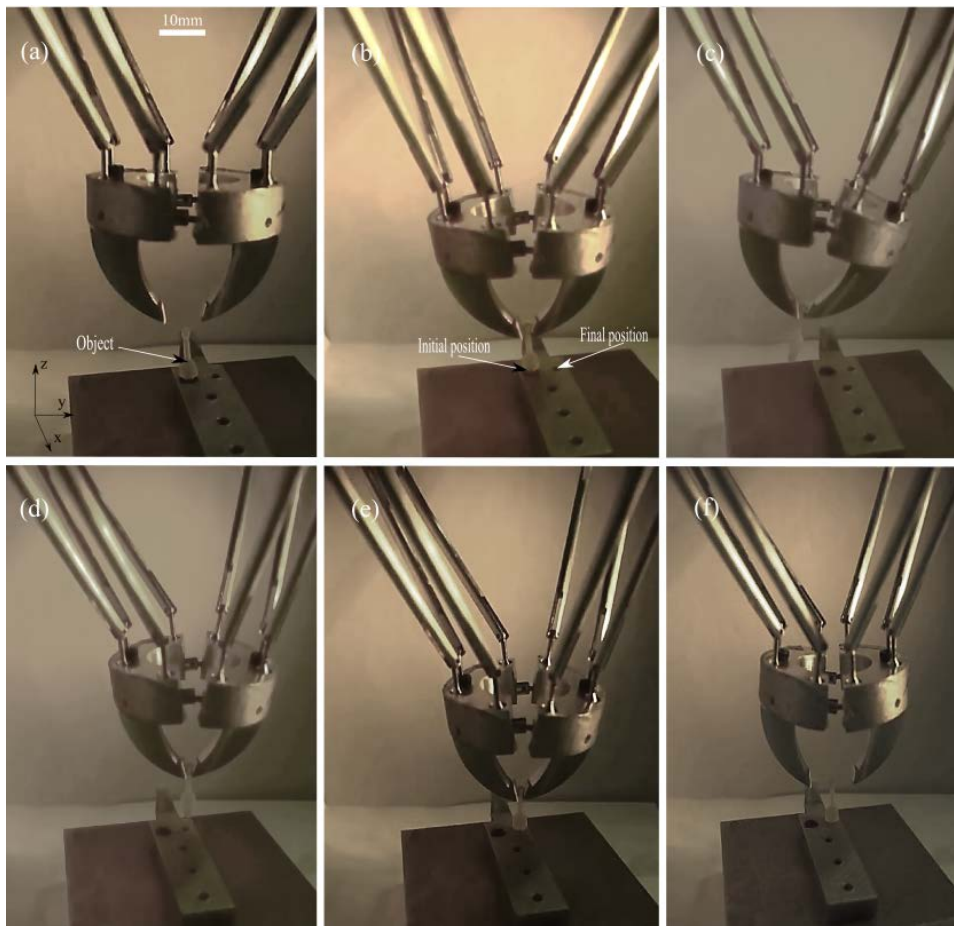
La figure suivante place les différents démonstrateurs sur une échelle dimensionnelle et les compare à des robots parallèles industriels bien connus.



Applications

Le micromanipulateur est caractérisé par six degrés de liberté en translation et en rotation auquel s'ajoute un degré de liberté au niveau de sa plateforme configurable. Ces sept mobilités en font l'un des robots les plus dextres existant à ce jour, en particulier pour la manipulation de composants de tailles de faibles dimensions. Il peut être utilisé pour la micromanipulation et le microassemblage à haute cadence, ainsi que la manipulation dans des espaces confinés (en chirurgie mini-invasive, en nano-manipulation, etc.). En fonction des applications, la structure peut être fabriquée à une échelle métrique (similaire à la taille des robots industriels), ou à une échelle miniaturisée (de l'ordre du centimètre cube).

Dans le domaine industriel, la structure parallèle du micromanipulateur le rend particulièrement adapté à la manipulation de composants millimétriques et micrométriques (composants horlogers, composants électroniques, etc.). Ce nouveau type de robot pourra surpasser à terme la précision de manipulation et les cadences de production des systèmes existants.



Séquence de manipulation dans les 6 DDL en plus de la préhension avec le démonstrateur 2 (voir également la vidéo jointe).

D'autres applications spécifiques sont visées dans des domaines présentant de fortes contraintes d'encombrement, comme par exemple dans le domaine médical pour la réalisation d'opération de chirurgie mini-invasive ou dans le domaine de la recherche pour des tâches de nanomanipulation. Dans le cas de la chirurgie mini-invasive, les actionneurs sont situés en dehors du corps du patient et leurs éléments mobiles sont très allongés pour transmettre les mouvements à l'outil chirurgical situé à l'intérieur du corps du patient. Cet outil chirurgical est constitué des deux parties mobiles de la plateforme équipées d'éléments de travail adaptés (pinces, ciseaux, etc.). Le dispositif apporte un gain d'espace par rapport à des solutions connues tout en garantissant une grande dextérité de travail au chirurgien.

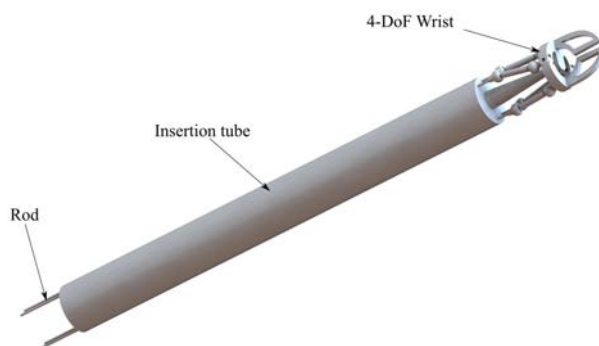
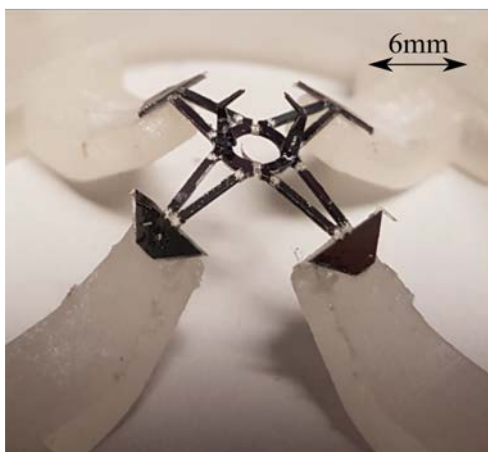


Illustration du micromanipulateur monté en bout d'un instrument de chirurgie mini-invasive.

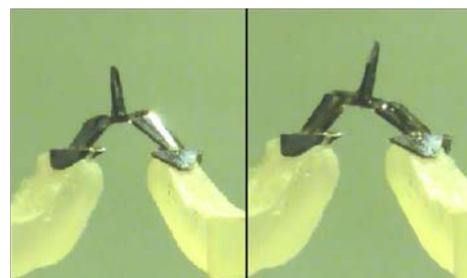
Dans le domaine de la recherche, le micromanipulateur peut réaliser des tâches de micro-nano-manipulation. Il est adapté à l'assemblage de microcomposants (optiques ou électroniques, fibres optiques, etc.), de nano-objets (nanotubes de carbone, graphène, etc.), ou pour des tests de caractérisation mécanique de micro-nano-objets.



Flexible 7DoF Micro-Manipulator



Grasping



Roll Rotation



Pitch Rotation

Exemple de mouvements du démonstrateur 1 (voir également la vidéo jointe).

Laboratoire et équipe

Le dispositif a été conçu et réalisé par des chercheurs et ingénieurs des équipes de nanorobotique et de robotique biomédicale du département AS2M de l'institut FEMTO-ST. L'institut FEMTO-ST est un laboratoire de recherche placé sous la quadruple tutelle du CNRS, de l'Université de Franche-Comté (UFC), de l'UTBM et de l'ENSMM. Les recherches menées au sein du département AS2M de l'institut traitent de l'automatique, de la robotique, de la mécatronique et du génie industriel. Les équipes de nanorobotique et de robotique biomédicale sont reconnues au niveau international pour leurs expertises dans les domaines de la robotique pour des applications de manipulation et d'assemblage automatisé aux échelles micro et nanométriques. Le micromanipulateur à 7 DDL a été conçu dans le cadre de la thèse de Wissem Haouas qui a également réalisé les démonstrateurs 1 et 2.

Wissem Haouas (doctorant), Redwan Dahmouche (maître de conférences UFC), Yannick Wunderle (ingénieur stagiaire), Joël Agnus (ingénieur de recherche), Sacha Gressani (étudiant ingénieur), Patrick Rougeot (ingénieur de recherche), Benjamin Mauzé (doctorant), Martin Iliou (ingénieur stagiaire), Nadine Piat (professeur ENSMM), Guillaume Laurent (maître de conférences ENSMM).

Le projet a été financé en partie par la région Bourgogne Franche-Comté, par l'ANR via l'équipex ROBOTEX et par la SATT Grand Est. Deux études de marchés ont été réalisées démontrant un intérêt important de la part des acteurs industriels.

Brevets et publications

Deux brevets ont été publiés en 2018. Le premier concerne le micromanipulateur à 7 DDL alors que le deuxième décrit une variante à 4 DLL. Plusieurs articles ont été publiés en 2017 et 2018 décrivant des analyses théoriques et numériques ainsi que des validations expérimentales des deux structures.

Brevets

1. Redwan Dahmouche et Wissem Haouas. Robotic structure with six degrees of freedom allowing gripping, WO 2018/065702 A1, 2018.
2. Guillaume J Laurent, Redwan Dahmouche, Wissem Haouas, et Nadine Le Fort-Piat. Parallel robotic wrist with four degrees of freedom, WO 2018/065734 A1, 2018.

Publications

3. Wissem Haouas, Redwan Dahmouche, Nadine Le Fort-Piat, et Guillaume J Laurent. A new seven degrees-of-freedom parallel robot with a foldable platform. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 10(4) :045001, 2018
4. Wissem Haouas, Redwan Dahmouche, Joël Agnus, Nadine Le Fort-Piat, et Guillaume J Laurent. New integrated silicon-PDMS process for compliant micro-mechanisms. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 27(12) :127001, 2017
5. Wissem Haouas, Redwan Dahmouche, Nadine Le Fort-Piat, et Guillaume J Laurent. 4-DoF spherical parallel wrist with embedded grasping capability for minimally invasive surgery. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 2363–2368. IEEE., 2016
6. Wissem Haouas, Redwan Dahmouche, et Guillaume J Laurent. Analysis of an integrated 4-DoF parallel wrist for dexterous gripping. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. 2018