

Sujet de thèse

Contributions à la maîtrise des robots sériels redondants : génération de trajectoires et co-manipulation orientée procédé

Equipe encadrante :

Richard BEAREE, PU (richard.bearee@ensam.eu), Laboratoire Lispen.

Hélène CHANAL, PU (helene.chanal@sigma-clermont.fr), Institut Pascal.

Localisation : L'hébergement de la thèse sera (au choix) sur le site de Sigma Clermont-Ferrand ou sur le site Arts et Métiers de Lille.

Cadre/Financement : ANR / PEPR Robotique

Début de la thèse souhaitée : 1^{er} septembre 2026

Mots clés : système robotique redondant ; génération de trajectoire ; co-manipulation

Sujet de thèse

En robotique, la gestion d'opérations et de procédés continus sur des pièces de grandes dimensions (usinage, fabrication additive, drapage de composite) est un besoin récurrent pour de nombreuses industries [1]. Dans ce cadre, les contraintes dimensionnelles et les contraintes d'accessibilité conduisent à exploiter des cellules robotisées à axes redondants, i.e. disposant d'un nombre d'articulation supérieure à 6. Le présent sujet de thèse se propose d'adresser deux contributions majeures et complémentaires concernant l'exploitation agile des systèmes robotisés redondants.

La première contribution visée porte sur la génération de trajectoire, qui permet de définir les mouvements du robot en fonction du temps vis-à-vis du programme à réaliser. Le programme spécifie des points de passage, un mode de déplacement attendu entre les points (par exemple articulaire ou cartésien, linéaire, circulaire...) et des vitesses de parcours désirées. Les méthodes disponibles en génération de trajectoire pour la robotique de procédé permettent la maîtrise du couple vitesse/position sur la trajectoire désirée [2]. Il n'existe toutefois pas de méthode de génération de trajectoire assurant la pleine maîtrise de la mise en mouvement (trajectoire articulaire de chacun des axes) pour les systèmes redondants [3]. En effet, la cinématique inverse des systèmes redondants conduit à un espace de solutions infini pour une même pose cartésienne (variété différentielle de mouvement propre). La résolution de cette indétermination peut passer par de nombreuses méthodes allant des méthodes locales basées sur la pseudo-inverse du jacobien et optimisant localement un critère défini [4], à des méthodes d'optimisation continues ou échantillonnées, très coûteuse en temps de calcul, en passant par les méthodes basées apprentissage et les différentes déclinaisons hybridant les approches précédentes. Dans le contexte de la robotique de procédé, il n'existe pas dans l'état de l'art de méthodes globales peu exigeante en terme de temps de calcul intégrant les contraintes propres au procédé (e.g. précision attendue, profile de vitesse le long de la trajectoire) compatible avec une exploitation dans un atelier industriel (objectif de temps de calcul de l'ordre de quelques minutes). Ce manque pénalise la performance des cellules robotisées redondantes en terme de précision dans la réalisation de la tâche et de productivité.

La seconde contribution concerne la co-manipulation robotisée, qui s'est démocratisée avec la robotique collaborative et le mode de programmation par « hand guiding ». Les algorithmes de commande en co-manipulation ne permettent généralement pas de maîtriser la sollicitation

cinématique des axes d'un robot à axes redondants lors d'un déplacement [6]. Toutefois, lors de l'apprentissage d'une trajectoire continue, il est indispensable que les configurations prises par le robot ne limitent pas ou n'influencent pas de façon importante les mouvements souhaités de l'effecteur co-manipulé par l'opérateur. La gestion de la transparence du guidage par l'Humain de l'organe terminal du robot redondant sur l'ensemble de l'espace atteignable est ainsi un verrou pour les systèmes redondants. Le développement d'une gestion dynamique, prédictive et temps réel des configurations du système robotisé redondant, se basant sur la manipulabilité lors du guidage, est un axe de développement envisagé dans cette thèse. La trajectoire opérationnelle enregistrée par co-manipulation sera alors une donnée d'entrée pour établir les trajectoires nécessaires à la mise en œuvre du procédé. Celle-ci pourra être filtrée afin de mieux correspondre aux exigences du procédé. Elle pourra aussi avantageusement être exploitée en consigne du générateur de trajectoire précédemment décrit afin de rejouer la trajectoire en optimisant les mouvements du robot avec des critères (temps, précision, profil de vitesse, rigidité) pertinents pour le procédé mis en œuvre.

En synthèse, le projet proposé ambitionne de relever les défis suivants :

- Défi 1 : Développement d'une méthode de génération de trajectoire générique permettant d'exploiter pleinement la cinématique des axes de manipulateurs sériels redondants, voire à axes souples, tout en garantissant la maîtrise de la précision et de la vitesse sur trajectoire.
- Défi 2 : Développement d'une stratégie de co-manipulation dynamique d'un manipulateur sériel redondant permettant la maîtrise de la trajectoire dans l'espace de travail.

Eléments du planning prévisionnel

- Etat de l'art sur les stratégies de gestion des redondances (notamment les méthodes hybrides rapides), la génération de trajectoire et les stratégies de co-manipulation.
- Mise en œuvre d'une campagne expérimentale pour éprouver les limites des solutions actuellement disponibles sur les robots des plateformes du LISPEN et de l'IP.
- Formalisation des enjeux liés à la génération de trajectoire des robots industriels à axes redondants.
- Définition d'une méthode de description de la trajectoire permettant d'optimiser les sollicitations cinématiques des axes du robot en fonction de critères de qualité et des exigences du procédé.
- Formalisation des enjeux liés à la co-manipulation des robots industriels à axes redondants.
- Synthèse d'une solution algorithmique de gestion des axes redondants facilitant la co-manipulation.
- Validation sur des démonstrateurs industriels, sur des procédés d'usinage et de fabrication additive.

Bibliographie

- [1] Cousturier, R. (2017). "Amélioration par la gestion de redondance du comportement des robots à structure hybride sous sollicitations d'usinage." (Doctoral dissertation, Université Clermont Auvergne [2017-2020]).
- [2] Olabi, A., Béarée, R., Gibaru, O., & Damak, M. (2010). "Feedrate planning for machining with industrial six-axis robots". *Control Engineering Practice*, 18 (5), 471-482, ISSN 0967-0661.
- [3] Baccomo, A., Chanal, H., & Duc, E. (2024). "Etude du comportement cinématique d'un robot lors de la fabrication d'une tubulure avec les procédés WAAM." *Manufacturing* 21, 5 et 6 juin 2024, Grenoble.

[4] D. Busson and R. Béarée, "A Pragmatic Approach to Exploiting Full Force Capacity for Serial Redundant Manipulators," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, no. 2, pp. 888-894, April 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2792541.

[5] Cl. Racinet, J-Ph. Pernot, L. Homri, L. Freund, R. Bigot, et al.. "Développement d'une méthode algorithmique stochastique itérative pour le calcul d'un self-motion manifold de dimension 1 d'un robot plan 3 axes". Colloque S.Mart 2025, GIS S.Mart RAO, May 2025, Vogüé (Ardèche- France), France.

[6] Bamaarouf, M., Paccot, F., Sarry, L., & Chanal, H. (2024). "Development of a Robotic Ultrasound System to Assist Ultrasound Examination of Pregnant Women." IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics.