UNIVERSITE DE STRASBOURG

ECOLE DOCTORALE MATHEMATIQUES SCIENCES DE L'INFORMATION ET DE L'INGENIEUR

RESUME DE LA THESE DE DOCTORAT

Discipline : SIAR

Spécialité (facultative) : Automatique et robotique

Présentée par : Khayour Imane

Titre :
Commande des robots parallèles à câbles avec actionneurs embarqués

Unité de Recherche : UMR 7357 – Laboratoire ICube

Directeur de Thèse : Gangloff Jacques – Professeur des universités

Co-Directeur de Thèse (s'il y a lieu) :

Localisation : Strasbourg

Thèse confidentielle : ☒ NON ☐ OUI

Cette thèse intitulée « *Commande des robots parallèles à câbles avec actionneurs embarqués* » a été préparée sous la direction de Jacques Gangloff et l'encadrement de Loïc Cuvillon et Sylvain Durand. Elle s'intéresse aux robots parallèles à câbles flexibles et se focalise sur l'amélioration de leur performance en utilisant des actionneurs embarqués. Elle vise à atteindre de meilleures performances dynamiques notamment avec un meilleur rejet des perturbations et un meilleur suivi de trajectoire.

Contexte et projet DexterWide

Ce travail s'intègre dans le projet ANR DexterWide qui vise à développer des outils permettant l'usage de robots anthropomorphes embarqués sur un robot parallèle à câbles afin de réaliser différentes tâches complexes comme : des manipulations dextres, des manipulations de charges importantes, des opérations de manutention dans un large espace de travail.
Un intérêt particulier est porté à la minimisation des vibrations de l'effecteur en ayant recours à des stratégies de commandes avancées.

Robots parallèles à câbles

Avec cette architecture, les corps qui soutiennent l'effecteur ne sont pas rigides mais constitués de câbles flexibles. Ils sont actionnés en enroulant et en déroulant des câbles avec des poulies. On peut donc déplacer l'effecteur en faisant varier la longueur des câbles.
La particularité des câbles est leur effort unilatéral : ils peuvent tirer une charge mais pas la pousser.

En raison de masses en mouvement relativement faibles, les robots parallèles à câbles peuvent atteindre des accélérations élevées. Ils sont également plus facilement transportables et reconfigurables car plus modulaires. Cependant, l'usage de câbles flexibles dégrade les performances en termes de précision et de temps d'établissement.
Pour améliorer la performance d'un robot parallèle à câbles flexibles, il est nécessaire d'atténuer les vibrations induites par la faible rigidité de l'effecteur actionné par câbles. Si ces robots sont uniquement actionnés par des enrouleurs, leur dynamique limitée ne permet pas de rejeter efficacement les vibrations.
En effet, plus les câbles sont longs ou/et élastiques, plus la longueur de câble à enrouler pour générer une force donnée est grande. Toutefois, comme les enrouleurs des câbles ont une vitesse maximale, la bande passante de la force exercée par les enrouleurs est limitée par cette saturation physique de leur vitesse.

Dans cette thèse, on propose d'évaluer la possibilité d'embarquer différents types d'actionneurs, dotés d'une bande passante plus élevée que celle des enrouleurs des câbles pour améliorer la dynamique du robot. Des expérimentations ont été menées pour évaluer la performance des différents actionneurs choisis.

Structure de la thèse

Après une introduction, le deuxième chapitre de la thèse est consacré à un état de l'art des différents travaux traitant des robots parallèles à câbles. Les différentes méthodes de réduction de vibrations/oscillations sont présentées. Etant donné que l'objectif de la thèse est d'améliorer la dynamique des robots en embarquant des actionneurs, l'état de l'art traite également la redondance d'actionnement et passe en revue les différents algorithmes utilisés pour sa gestion.

Le chapitre 3 est dédié à la modélisation du robot parallèle à câbles. Un premier modèle est synthétisé incluant l'action des câbles. Ensuite, un deuxième modèle qui décrit la dynamique du système comprenant les actionneurs embarqués est établi.
Chacun de ces modèles est développé en incluant à la fois la dynamique des enrouleurs et des actionneurs embarqués. Comme cette thèse vise à développer et tester entre autres des commandes linéaires, un modèle linéarisé, qui servira de base pour les futures commandes, est calculé analytiquement.

Le chapitre 4 valide l'utilisation des propulseurs à air comprimé pour améliorer la dynamique d'un robot parallèle à câbles. Ces propulseurs ont une dynamique beaucoup plus rapide que celle des enrouleurs.
Une première étude a porté sur de l'amélioration de la réjection des perturbations sur la plateforme d'un robot parallèle à câbles plan suivant ses trois degrés de liberté en utilisant les propulseurs à air comprimé embarqués. Deux approches d'amortissement actif sont comparées. Une première approche est composée de deux étapes. Elle comprend la synthèse de la loi de commande et l'allocation des actionneurs. Une deuxième approche combine les différentes étapes de la première en une seule et utilise le formalisme d'une commande prédictive. Ces deux méthodes prennent en compte les contraintes des actionneurs.

La dynamique rapide des propulseurs de drones leur permet également d'être de bons candidats pour améliorer la dynamique de l'effecteur. Pour évaluer ce type de propulseur, un suivi de trajectoire a été proposé, dans le chapitre 5. On s'intéresse d'abord au cas d'un robot à un degré de liberté (1-ddl) puis au cas d'un robot à deux degrés de liberté (2-ddl) combinant à la fois l'action des enrouleurs et celle des actionneurs embarqués (propulseurs). Une commande prédictive linéaire a été développée pour ces deux robots à 1-ddl et 2-ddl. Cette commande présente des particularités intéressantes telles la prédiction et la prise en compte des saturations. Pour le robot parallèle à câbles plan, on choisit d'évaluer et de tester une commande prédictive non-linéaire dans le chapitre 6.

Le dernier chapitre tire diverses conclusions relatives aux choix des actionneurs et dresse une comparaison entre les différents résultats obtenus. Les perspectives de ce travail sont aussi présentées.

Contributions
Ce travail a mené à plusieurs contributions dans le domaine de la commande appliquée à la robotique, dont :

- Utiliser des actionneurs embarqués originaux : légers, compacts et surtout rapides sur un robot parallèle à câbles pour en améliorer la dynamique,
- Synthétiser une loi de commande adaptée aux particularités de chaque actionneur choisi,
- Combiner l'action des enrouleurs et de dispositifs embarqués pour le suivi de trajectoire d'un robot parallèle à câbles et le rejet de perturbations.

Cette thèse a produit les publications suivantes :

- **Hugo Sellet, Imane Khayour, Loic Cuvillon, Sylvain Durand, Jacques Gangloff (2019), "Active Damping of Parallel Robots Driven by Flexible Cables Using Cold-Gas Thrusters", International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2019, Montreal, Canada.**

- **Imane Khayour, Sylvain Durand, Loic Cuvillon, Jacques Gangloff, "Active Damping of Parallel Robots Driven by Elastic Cables using On-Off Actuators through Model Predictive Control Allocation", International Federation of Automatic Control, IFAC World Congress, 2020, Berlin, Germany.**

- **Imane Khayour, Loïc Cuvillon, Côme Butin, Arda Yiğit, Sylvain Durand, Jacques Gangloff, "Improving Disturbance Rejection and Dynamics of Cable Driven Parallel Robots with On-board Propellers ", International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020.** *(soumis)*