

RESUMO

As limitações exibidas pelos robôs industriais actuais na execução de tarefas que envolvem contacto físico entre o manipulador e o seu ambiente devem-se, sobretudo, a duas características principais: ao seu subsistema de controlo *de posição*, que trata as forças de interacção como quaisquer outras perturbações que devem ser rejeitadas, e à sua estrutura mecânica *em série*, cuja elevada massa móvel restringe a largura de banda do robô, desencorajando uma eventual modificação do seu subsistema controlador com vista à implementação de estratégias de *controlo de força*.

Actualmente são usados dispositivos auxiliares específicos, montados entre o último elo do manipulador e a garra, que, ao introduzirem alguma elasticidade passiva, conferem ao manipulador a capacidade de acomodação às forças de contacto necessária à robotização de certas operações. Os dispositivos mais conhecidos dão pelo nome de "Remote Centre of Compliance" (RCC), sendo especialmente utilizados em operações de montagem robotizada. Em geral, tais dispositivos são simples e de baixo custo, mas são pouco flexíveis.

Esta tese descreve a realização de um novo dispositivo auxiliar - *o Dispositivo de Impedância Controlada (DIC)* - a montar na extremidade de um manipulador industrial, tal como um RCC, mas que permite, de forma activa, definir e controlar a impedância mecânica que o manipulador exhibe ao ambiente ou, directamente, definir e controlar a força de contacto. Trata-se de um mini-robô *plenamente paralelo* com 6 gdl (plataforma de Merlet) no qual está implementado um novo controlador de *força-impedância*. O sistema robótico resultante é constituído pelo robô industrial em cooperação com o dispositivo auxiliar. O desempenho do sistema em controlo de força e impedância é determinado pelo dispositivo, mantendo-se o volume de trabalho do manipulador industrial.

A realização de tal dispositivo requereu investigação e desenvolvimento na área da modelação de manipuladores paralelos e na área da teoria do controlo de força e de impedância: efectuou-se uma optimização geométrica de uma plataforma de Merlet, com base num critério de mobilidade máxima, e propôs-se uma configuração estrutural óptima para a aplicação pretendida; foram desenvolvidos modelos dinâmicos de uma plataforma de Merlet, usando alguns métodos clássicos e através de uma nova abordagem à modelação dinâmica de manipuladores, baseada na utilização da quantidade de movimento generalizada; desenvolveu-se uma nova estratégia de controlo de força-impedância; foi construído um protótipo de robô paralelo baseado numa plataforma de Merlet; aplicou-se a nova estratégia de controlo de força-impedância ao protótipo construído e avaliaram-se experimentalmente as suas potencialidades.

Mostrou-se que o controlador assegura que o dispositivo em espaço livre apresenta erro de posição nulo. Em contacto, permite-lhe um comportamento que pode ser interpretado de duas formas: *controlo de impedância com limitação de força* ou *controlo de força com limitação de posição*.

Os dois modos de funcionamento dependem apenas das trajectórias programadas no manipulador industrial. O tipo de comportamento exibido pelo dispositivo assegura uma elevada robustez do sistema face aos erros de modelação do ambiente e aos erros de posicionamento do robô industrial.

Palavras Chave: Manipuladores Paralelos; Optimização Cinemática; Modelação Dinâmica; Controlo de Força; Controlo de Impedância.

RÉSUMÉ

Les limitations exhibées par les robots industriels actuels dans l'exécution de tâches qui exigent le contact physique entre le manipulateur et son environnement sont dues, surtout, à deux caractéristiques principales: à leur sous-système de commande de *position*, qui traite les forces d'interaction comme tout autre perturbation qui doit être rejetée, et à leur structure mécanique *en série*, dont la masse mobile élevée restreint la bande-passante du robot, en décourageant une modification de son sous-système de commande en vue de l'implantation de stratégies de *commande de force*.

Actuellement, des dispositifs auxiliaires spécifiques sont utilisés, montés entre le dernier lien du manipulateur et le préhenseur, qui, en introduisant une certaine élasticité passive, confèrent au manipulateur la capacité d'accommodation aux forces de contact nécessaire à la robotisation de certaines opérations. Les dispositifs les plus connus sont nommés "Remote Centre of Compliance" (RCC), et ils sont spécialement utilisés dans les opérations d'assemblage robotisé. En général, ces dispositifs sont simples et à bas prix, mais ils sont peu flexibles.

Cette thèse décrit la réalisation d'un nouveau dispositif auxiliaire - le *Dispositif d'Impédance Contrôlée (DIC)* - à fixer sur l'extrémité d'un manipulateur industriel, tel qu'un RCC, mais qui permet, de façon active, de définir et de commander l'impédance mécanique que le manipulateur exhibe à l'environnement ou, de définir et de commander directement la force de contact. Il s'agit d'un mini-robot *pleinement parallèle* à 6 degrés de liberté (plateforme de Merlet) sur lequel est implémenté un nouveau correcteur de *force-impédance*. Le système robotique qui en résulte est constitué par le robot industriel en coopération avec le dispositif auxiliaire. La performance du système en commande de force et d'impédance est déterminé par le dispositif, en gardant le volume de travail du manipulateur industriel.

La réalisation d'un tel dispositif a exigée de la recherche et du développement dans le domaine de la modélisation de manipulateurs parallèles ainsi que dans le domaine de la théorie de la commande de force et d'impédance: une optimisation géométrique d'une plateforme de Merlet a été effectuée, ayant comme base un critère de mobilité maximale, et une configuration structurale optimale a été proposée pour l'application désirée; des modèles dynamiques d'une plateforme de Merlet ont été développés en utilisant quelques méthodes classiques, ainsi qu'une nouvelle étude de modélisation dynamique de manipulateurs, basée sur l'utilisation de la quantité de mouvement généralisée; une nouvelle stratégie de commande de force-impédance a été développée; un prototype de robot parallèle basé sur une plateforme de Merlet a été construit; la nouvelle stratégie de commande de force-impédance a été appliquée au prototype construit et ses potentialités ont été évaluées expérimentalement.

Il a été démontré que le correcteur assure que le dispositif en espace libre présente une erreur de position nulle. En contact, il lui permet un comportement qui peut être interprété de deux façons: *commande d'impédance avec limitation de force* ou *commande de force avec limitation de position*.

Les deux modes de fonctionnement dépendent seulement des trajectoires programmées dans le manipulateur industriel. Le type de comportement exhibé par le dispositif assure une robustesse élevée du système face aux erreurs de modélisation de l'environnement et aux erreurs de positionnement du robot industriel.

Mots-clés: Manipulateurs Parallèles; Optimisation Cinématique; Modélisation Dynamique; Commande de Force; Commande d'Impédance.

ABSTRACT

The limitations displayed by current industrial robots on the execution of tasks involving physical interaction with its environment are mostly due to two main characteristics: the *position* control subsystem, that deals with contact forces as any other perturbations to reject, and the *serial* mechanical structure, that presents a restricted bandwidth due to excessive inertia. These tend to hold back changes to the controller subsystem as the implementation of *force control* strategies.

Nowadays some specific auxiliary devices are mounted between the last link of the manipulator and its gripper in order to introduce a passive compliance, enabling the execution of some tasks. The mostly known device of this kind is the "Remote Centre of Compliance" (RCC), mainly used on robotic assembly tasks. Such devices are simple and low cost but lack flexibility.

This thesis presents the development of a novel auxiliary device - the Robotic Controlled Impedance Device (RCID) - to be mounted on the last link of an industrial robot as the RCC. This novel device enables the active control of the mechanical impedance presented by the manipulator to its environment or the direct control of the contact forces. The device is a fully parallel 6 dof mini-manipulator (Merlet platform) using a new *force-impedance* controller. The resulting robotic system comprises an industrial robot and the RCID working in co-operation. The workspace of the industrial robot is kept while force and impedance control performance is determined by the RCID.

The implementation of such device required research and development actions on the areas of parallel manipulators modelling and force and impedance control theory: the geometric optimisation of the Merlet platform was carried out using a criterion of mobility maximisation, leading to an optimal configuration for the required application; dynamic models of a Merlet platform were developed, using both classic methods and a new approach based on generalised momentum; a novel force-impedance control strategy was elaborated; a functional prototype of the RCID was built, based on the optimised Merlet platform; the new control strategy was applied to the prototype and its performance was experimentally evaluated.

The new controller achieves free space null position error. Under a contact situation it enables two behavioural modes: *force limited impedance control* or *displacement limited force control*.

The two working modes are only dependent on the programmed trajectories of the industrial robot. The resulting behaviour is highly robust to both environment-modelling errors and industrial robot positioning errors.

Key words: Parallel Manipulators; Kinematic Optimisation; Dynamic Modelling; Force Control; Impedance Control.