



Robots à Architecture Complexe : De la Conception à la Performance et l'Autonomie

Nicolas Andreff, Belhassen-Chedli Bouzgarrou, Etienne Dombre, Damien Chablat, Olivier Company, Jean-Christophe Fauroux, Grigoré Gogu, Wisama Khalil, Sébastien Krut, Frédéric Marquet, et al.

► To cite this version:

Nicolas Andreff, Belhassen-Chedli Bouzgarrou, Etienne Dombre, Damien Chablat, Olivier Company, et al.. Robots à Architecture Complexe : De la Conception à la Performance et l'Autonomie. Journées Bilan du Programme Interdisciplinaire ROBEA, 2002, Toulouse, France. pp.7-11. lirmm-00268624

HAL Id: lirmm-00268624

<https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-00268624>

Submitted on 11 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Robots à architecture complexe : de la conception à la performance et l'autonomie

N. Andreff⁽³⁾, C.B. Bouzgarrou⁽³⁾, E. Dombre⁽⁵⁾, D. Chablat⁽¹⁾, O. Company⁽⁵⁾, J.-C. Fauroux⁽³⁾, G. Gogu⁽³⁾, W. Khalil⁽¹⁾, S. Krut⁽⁵⁾, F. Marquet⁽⁵⁾, P. Martinet⁽⁴⁾, J.-P. Merlet⁽²⁾, F. Pierrot⁽⁵⁾, P. Poignet⁽⁵⁾, P. Ray⁽³⁾, P. Renaud⁽⁴⁾,
A. Vivas⁽⁵⁾, P. Wenger⁽¹⁾
IRCCyN⁽¹⁾, INRIA⁽²⁾, LaRAMA⁽³⁾, LASMEA⁽⁴⁾, LIRMM⁽⁵⁾

Résumé—Cet article donne un aperçu des activités menées par les équipes de cinq laboratoires concernant les robots à architecture parallèles. Les apports concernent aussi bien la conception mécanique, la modélisation et l'identification, que la commande. Les travaux comprennent des volets théoriques autant qu'expérimentaux.

Mots clés—mécanisme parallèle, conception, modélisation, identification, commande.

I. OBJECTIF SCIENTIFIQUE

L'accroissement de la complexité architecturale des robots de demain – mise en parallèle de boucles mécaniques, nombre toujours grandissant d'articulations actives ou passives, redondance de capteurs ou d'actionneurs – rend toujours plus lointain l'objectif ultime des robots à architecture complexe : marier performance et autonomie. Pourtant les qualités intrinsèques des machines parallèles modernes sont aujourd'hui reconnues par les milieux de la recherche dans des domaines aussi variés que ceux qui s'adressent à la robotique à très grande vitesse, l'aide au geste médical, les simulateurs de comportement, les équipements de loisirs, la machine-outil, etc. Les points durs de ce domaine de recherche peuvent être classés en quatre catégories :

Sur le plan de leurs structures, les machines proposées jusqu'à aujourd'hui souffrent souvent de défauts « naturels » qui en limitent l'intérêt hors du cercle de la recherche académique ; la grande variabilité de leur comportement est un bon exemple de ce type de défauts ;

Sur le plan métrologique, le principe même des machines parallèles doit leur permettre d'offrir des qualités de précision remarquables, mais les méthodes et outils d'étalonnage et d'identification usuels sont souvent incapables de traiter correctement le cas des machines complexes ;

Sur le plan des performances dynamiques, la plus grande complexité des modèles mis en jeu a jusqu'ici limité les ambitions des équipes traitant les problèmes de commande qui ont dû se restreindre à la mise en place de solutions classiques ne tirant pas parti d'une des qualités majeures de ces machines : la bonne dynamique.

Sur le plan de l'autonomie, rien, ou presque, n'a été fait pour doter ces machines de capacités d'adaptation ou d'autonomie face à des évolutions d'environnement ou de structure au cours du cycle de vie.

L'objectif à moyen terme est donc de proposer une démarche, reposant sur un champ de compétences pluridisciplinaire, qui permette de prendre en compte les notions de performance et d'autonomie dès le stade de la conception, mais également de considérer les problèmes fondamentaux d'identification géométrique et dynamique,

pour aboutir à des principes de commande garantissant les performances. Elle offrira une ouverture vers des capacités d'auto étalonnage, d'autocorrection, voire d'auto maintenance, dans une approche s'inspirant des concepts de *dépendabilité*.

Les robots complexes pourront alors être conçus, identifiés et commandés de manière à leur donner une connaissance fine de leur propre comportement pour savoir s'adapter aux changements d'environnement et retrouver de manière robuste leurs performances après modifications de leur propre structure.

Nous nous intéressons ici aux robots parallèles, y compris les mécanismes hybrides ou redondants, destinés aux activités réclamant vitesse *et* précision. L'objectif à moyen terme est donc la création d'une nouvelle génération de machines dotées de capacités de commande référencée capteur ou référencée modèle, pour les activités à très grande vitesse et très grande précision ; nous abordons ici les premières étapes d'une démarche visant à atteindre cet objectif ambitieux.

II. APPROCHE

L'approche proposée est à la fois « pluridisciplinaire » puisque associant mécanique, traitement du signal et automatique, et « multi-activités » puisque nécessitant des efforts fondamentaux et expérimentaux. Le ciment de cette démarche « conception – identification – commande – est bien entendu constitué par les modèles : concevoir pour que des modèles aient des performances au minimum égales à des caractéristiques pré-définies, en prenant en compte les erreurs de fabrication, identifier pour en estimer les caractéristiques vraies, commander en utilisant des modèles en temps-réel.

A. Conception

Nous proposerons d'abord des méthodes de synthèse de machines répondant dès la phase de conception initiale à des objectifs de performances ; on s'intéressera en particulier à des méthodes de synthèse morphologique de robots parallèles de 2 à 6 degrés de liberté, selon deux axes :

✂ Une approche morphologique utilisant l'algèbre des espaces vectoriels. L'accent sera mis sur l'identification des positions singulières et le choix des articulations motorisées pour éviter les blocages dans les positions singulières, évidemment préjudiciables à l'efficacité des méthodes de commande.

✂ Une approche prenant en compte les aspects suivants : (i) imprécision, (2) statique (détermination des efforts maximaux des actionneurs), (iii) présence de singularités, (iv) effet des tolérances de fabrication sur le

fonctionnement effectif (évaluation des mouvements selon des degrés de liberté nuisibles ou non souhaités).

A partir de ces travaux des architectures de machines seront imaginées, limitant la variabilité de leurs caractéristiques essentielles ; bien que cette activité contienne une large part « d'imprévisible » puisqu'il s'agit essentiellement d'une activité inventive, l'effort sera concentré et dirigé sur deux voies principales : l'apport de la redondance pour les machines parallèles, et la recherche de solutions isotropes.

B. Métrologie

Les besoins de recherche dans ce domaine sont énormes, mais tributaires pour une large part de certaines avancées technologiques, ou de la disponibilité de moyens qui dépassent le cadre du P.I.R. Robea. Nous n'aborderons ici qu'une partie modeste de ces problèmes, en nous concentrant sur l'évaluation de moyens de vision rapide et précise, afin de définir une chaîne de perception compatible avec les besoins d'identification des machines à hautes performances, l'ambition étant de développer des méthodes et des systèmes de métrologie multi-capteurs (télémètre LASER, vision, accéléromètre, etc).

C. Etalonnage géométrique

Il s'agit là de la première étape indispensable vers la précision ; l'objectif de l'étalonnage géométrique est en effet d'identifier les valeurs des paramètres géométriques du mécanisme. Pratiquement, on cherche à trouver le jeu des paramètres géométriques qui font coïncider au mieux un modèle mathématique fonction de ces paramètres. Plusieurs approches complémentaires vont être développées et comparées sur des prototypes.

D. Identification dynamique

L'objectif est d'identifier les valeurs numériques des paramètres physiques (paramètres inertiels, paramètres de frottement, paramètres de déformations élastiques) du modèle dynamique du robot. Le modèle dynamique identifié peut être utilisé sous une forme directe ou inverse pour la conception du robot, sa simulation et sa commande avancée. Des approches basées sur l'utilisation du modèle directe ou inverse et sur l'utilisation de mesures internes (capteurs proprioceptifs (accéléromètres, capteurs de position, de courant) et externes (en particulier, la vision rapide s'avère prometteuse et nécessitera le développement de capteurs rapides et spécifiques dédiés à l'identification dynamique) seront comparées expérimentalement.

E. Commande

Le modèle dynamique identifié sera utilisé dans des lois de commande avancée pour améliorer la précision et la rapidité des robots en poursuite de mouvements par rapport aux commandes classiques proposées généralement sur les machines industrielles. Plusieurs méthodes telles que la commande dynamique, la commande prédictive ou les techniques référencées capteurs seront comparées expérimentalement sur des prototypes.

III. PREMIERS RESULTATS ET TRAVAUX EN COURS

A. Calcul de la mobilité[1]

Les formules de calcul de la mobilité des mécanismes, connues dans la littérature, ont un domaine d'applicabilité restreint. Elles donnent des résultats erronés pour plusieurs types de mécanismes (voir le robots Delta, Orthoglide ou H4). En plus, l'utilisation de ces formules dans la synthèse structurale des robots parallèles limite considérablement le nombre de solutions. Nous avons développé un algorithme et une formule générale de calcul de la mobilité, valables pour tout type de mécanisme (à chaîne ouverte ou fermée, à chaîne élémentaire ou complexe). L'algorithme est basé sur le calcul symbolique de la base et de la dimension de l'espace opérationnel. Notre approche intègre le modèle géométrique et cinématiques directs et inverses et représente un développement de la méthode TCS et de l'algorithme de calcul de la matrice jacobienne que nous avons proposés. Le calcul de la base et de la dimension de l'espace opérationnel permet en même temps d'identifier les positions singulières du robot et de choisir les articulations motorisées du robot pour éviter les blocages dans les positions singulières.

B. Conception de machine parallèle isotrope [6][15]

L'objectif était la conception d'une machine 3 axes rapide d'architecture parallèle, extensible à 5 axes, ne présentant pas les inconvénients inhérents aux mécanismes parallèles. Les critères principaux de conception qui ont donc été retenus sont les suivants :

- ☞ 3 actionneurs fixes de type glissières (diminution des inerties, possibilité d'utiliser des moteurs linéaires, meilleure dissipation thermique) ;
- ☞ volume de travail de forme régulière proche d'un cube ;
- ☞ homogénéité des performances dans tout le volume de travail et dans toutes les directions ;
- ☞ symétrie de construction (diminution des coûts) ;
- ☞ articulations simples (pas de cardan ni de rotule).

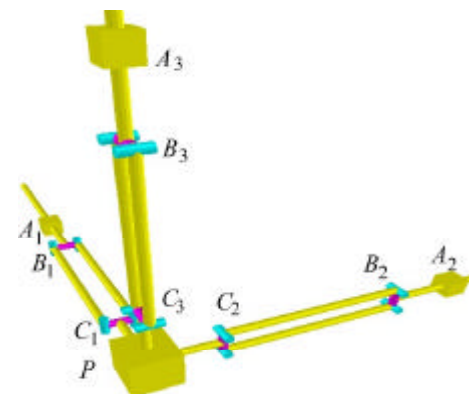


Figure 1. Principe cinématique d'Orthoglide.

Un prototype peu onéreux à échelle réduite a été réalisé en fonction de ce cahier des charges pour valider la cinématique et notre méthode de conception. La partie informatique et commande est maintenant opérationnelle.

Compte-tenu des objectifs cités précédemment, la cinématique de base de l'orthoglide repose sur un ensemble de trois liaisons glissières motorisées qui actionnent l'outil selon un mouvement de translation spatiale. L'outil est relié aux actionneurs par le moyen de trois jambes identiques

constituées de parallélogrammes articulés. Le critère d'isotropie a été utilisé pour optimiser les dimensions et les limites articulaires de l'orthoglide

Le choix de l'agencement orthogonal des liaisons glissières motorisées est justifié par le critère d'isotropie et d'homogénéité des performances. La figure 2 montre une photo du prototype expérimental de l'orthoglide.



Figure 2. Le premier prototype d'Orthoglide.

C. Architectures à grands débattements angulaires[12]

Une limite très souvent rencontrée pour bon nombre de mécanismes parallèles est la faiblesse des capacités d'orientation. Une piste nouvelle a été explorée : l'ajout au niveau de la nacelle de dispositifs d'amplification des mouvements de rotation. Une architecture a été étudiée en particulier (dénommée Twice) qui permet de doubler les mouvements en rotation selon deux axes, permettant d'explorer un hémisphère complet si la nacelle d'origine est capable de s'orienter dans un cône d'ouverture 90°.

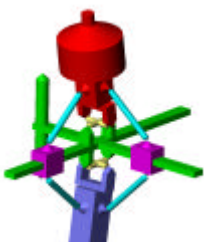
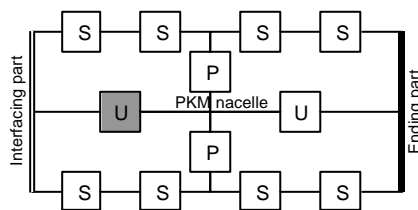


Figure 3. Un dispositif d'amplification des rotations.



D. Modélisation dynamique [2][3]

L'établissement du modèle dynamique des robots est une étape fondamentale de ce projet ; en effet, le modèle dynamique est au cœur des activités d'identification et de commande. Encore très récemment, les outils de génération de modèles dynamiques étaient limités aux cas des chaînes ouvertes, ou ne comportant que des boucles cinématiques simples. Un pas important vient d'être franchi, puisque des mécanismes aussi complexes que l'architecture Gough-

Stewart peuvent être modélisées en suivant la démarche suivante.

La forme de ces modèles permet de déduire une interprétation physique facilitant son calcul et permettant de développer directement les modèles dynamiques d'autres structures parallèles.

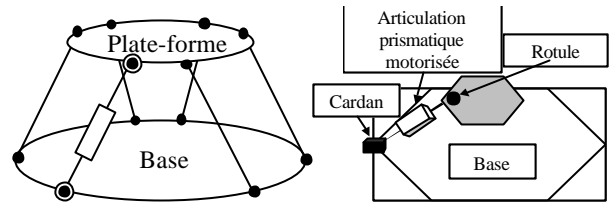


Figure 4. Robot du type Gough-Stewart.

Le modèle dynamique inverse de la structure complète est équivalente à la modélisation d'un corps unique, la plate-forme mobile, soumis aux forces extérieures aux points d'attaches. Ces forces sont représentées par le modèle dynamique inverse de chaque branche exprimées dans l'espace cartésien de position dont l'origine est le point d'attache de la branche avec la plate-forme.

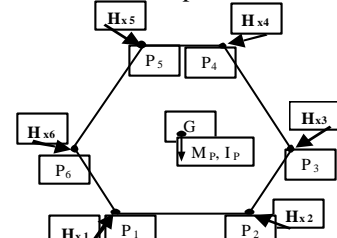


Figure 5. Modèle dynamique inverse.

La matrice d'inertie du robot complet est équivalente à la matrice d'inertie spatiale de la plate-forme et des matrices masses (3x3) attachées aux points d'attaches. Ces matrices masses représentent l'inertie de chaque branche au point d'attache avec la plate-forme (figure 7). La méthode a été validée tant sur l'architecture Gough-Stewart que sur l'architecture Orthoglide.

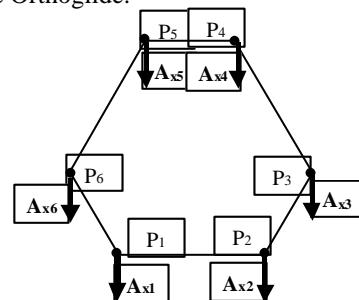


Figure 6. Inertie totale d'un robot parallèle

E. Etalonnage géométrique par vision [8][9][10][11]

Un des voies intéressantes pour rendre les mécanismes parallèles plus « autonomes » consiste à les doter des moyens matériels et logiciels d'étalonnage. Une première étape sur cette voie a consisté à évaluer l'apport de la vision pour l'étalonnage géométrique. En pratique, des essais ont été menés avec une caméra très simple (résolution 1024*768, codage sur 8 bits, optique 3,8mm) sur un robot parallèle à 4 degrés de liberté, en cherchant à identifier plusieurs modèles, dont le modèle (très simple lui aussi) utilisé pour la commande de la machine. Les outils logiciels mis en œuvre

ont permis de faire passer la précision de plusieurs *mm* à moins de *0.5mm*. Il est à noter que cette approche est parfaitement compatible avec l'utilisation de capteurs redondants [14].

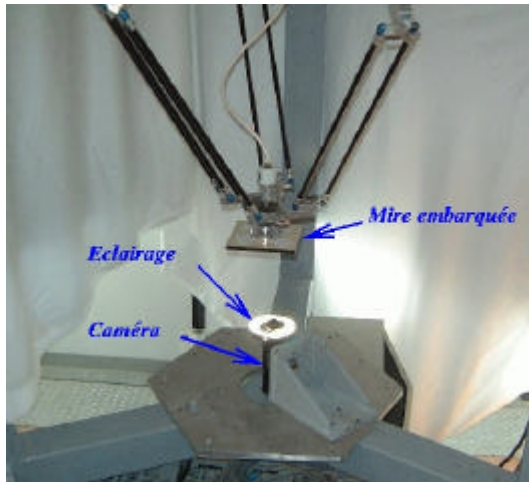


Figure 7. Mesures de position par vision.

F. Evaluation de la rigidité

L'optimisation de la rigidité d'une machine est une donnée importante conditionnant le type de tâche qu'elle peut effectuer. Le but de cette action clé est de comparer différentes solutions permettant d'obtenir des informations sur la rigidité des machines parallèles et d'en extraire des règles de conception. Les trois solutions envisagées sont:

- /// Modélisation éléments finis
- /// Analyse par des calculs analytiques
- /// Mesure sur le prototype

Ces trois méthodes sont complémentaires de par leurs spécificités en termes de temps de calcul et de précision. Les résultats obtenus par ces trois méthodes sont comparés. Les travaux suivants ont déjà été menés à bien :

- /// premier modèle éléments finis du robot H4 ;
- /// écriture des modèles analytiques de la rigidité du robot ;
- /// première campagne d'essais sur prototype H4.

Cette campagne d'essais a d'ores-et-déjà mis en évidence un dissymétrie du comportement du robot : cette information servira de point de départ à une nouvelle conception .



Figure 8. Mesures de déformations

G. Identification dynamique [7]

L'identification du modèle dynamique rigide (paramètres inertiels sans flexibilité) avec la prise en compte d'un modèle de frottements secs et visqueux du robot H4 pleinement parallèle à 4 degrés de liberté a été réalisée à partir du modèle inverse. Ce modèle dynamique simplifié défini à partir de considérations physiques - Le couple doit entraîner les moteurs et la nacelle en translation et rotation. L'effet des barres de liaison est négligé - est linéaire par rapport aux paramètres ce qui permet l'extension des méthodes d'estimation des moindres carrés pondérés utilisées dans le contexte des robots manipulateurs. Les résultats expérimentaux obtenus sur le robot H4 sont tout à fait satisfaisants et prouvent l'efficacité des techniques employées. Deux types d'expérimentation ont été menés pour quantifier la nécessité (ou l'apport) de capteurs additionnels en terme de qualité de l'estimation. L'ajout d'un capteur d'accélération tri-axial et d'un capteur de rotation sur la nacelle améliore sensiblement les résultats principalement les termes de frottements visqueux et leurs écarts-types relatifs. Cependant au vu des résultats pour le modèle rigide, ces capteurs supplémentaires ne sont pas strictement indispensables même pour un robot pleinement parallèle dont tous les actionneurs et capteurs sont fixes et posés sur la base. Sur la base des modèles estimés, une campagne d'essais pour comparer les performances et la robustesse de commandes référencées modèles (commande dynamique et commande prédictive) est en cours. Les premiers résultats seront disponibles avant la fin de l'année 2002.

H. Analyse par intervalle [5]

Le dimensionnement de l'Orthoglide a été réalisé en utilisant des contraintes sur les facteurs d'amplification de vitesse sur l'espace de travail. La résolution de ce problème consisté à vérifier que les racines d'un polynôme du troisième degré étaient incluses dans un intervalle donnée. Cette propriété du problème rend possible l'utilisation de la bibliothèque ALIAS développé par JP Merlet. Un code Maple et C++ a été créer pour résoudre ce problème et les routines MAPLE ainsi développées pour ce problème, sont intégrées dans le bibliothèque ALIAS.

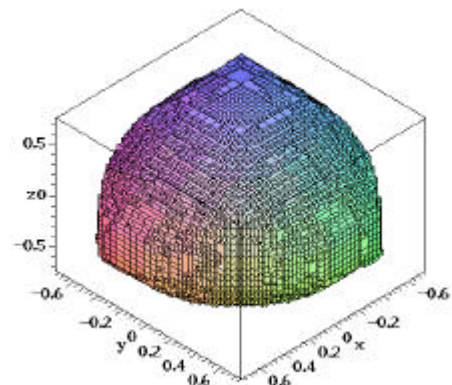


Figure 9 : Espace de travail dextre de l'Orthoglide

Pour valider ces contraintes, l'espace de travail est divisé en un ensemble de boîtes. Dans chacune d'elle, les propriétés des facteurs d'amplification de vitesse sont vérifiées de

manière exacte. Deux types d'espace de travail ont été ainsi calculés. Le premier est l'espace de travail dextre (Figure 4) et le second est l'espace de travail cubique le plus grand inclus dans l'espace de travail dextre.

Les résultats trouvés ont été comparés avec ceux trouvés par des méthodes discrètes et une étude est en cours pour comparer l'Orthoglide à une autre architecture en utilisant les mêmes contraintes.

1. Commande de robots redondants [13]

Utiliser la redondance d'actionnement est une solution séduisante pour dépasser les limitations dues aux singularités de type « parallèle », mais les robots deviennent alors « sur-motorisés » et il convient de définir des lois de commande adaptées. Dans le cadre du projet, trois approches ont été étudiées et comparées :

- ✂ Minimisation de la norme 2 du vecteur des forces motrices ;
- ✂ Minimisation d'une force définie comme « force interne », à la manière des robots à deux bras ;
- ✂ Minimisation de la norme *max* du vecteur des forces motrices.

Ces trois approches ont été validées expérimentalement, et leurs avantages/inconvénients respectifs mis en avant.

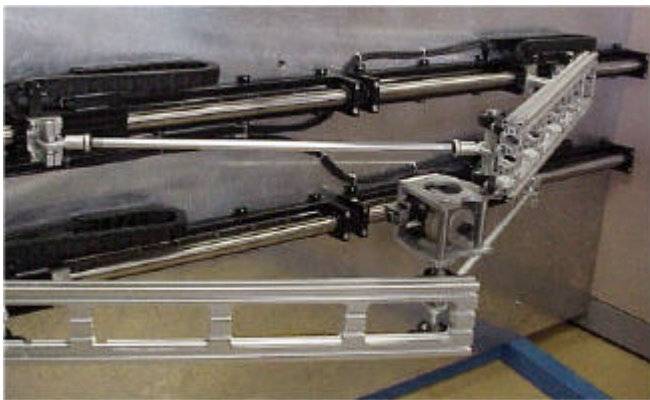


Figure 10. Prototype de robot parallèle redondant

IV. TRAVAUX FUTURS

De nouvelles architectures de mécanismes sont en cours d'étude :

- ✂ un nouveau prototype à nacelle articulée devrait être opérationnel au LIRMM début 2003.
- ✂ Un nouveau robot parallèle à 4 degrés de mobilité d'une architecture originale, le robot 3T1R, isotrope dans tout l'espace de travail et avec des mouvements découplés est en cours de réalisation au LaRAMA ;
- ✂ L'ajout de deux axes supplémentaires à l'Orthoglide est en cours d'étude pour en faire une machine à 5 axes destinée à l'usinage de surfaces gauches.

Les études sur l'identification par vision vont être poursuivies en s'attachant à affiner certains modèles.

L'arrivée du prototype d'Orthoglide, déjà opérationnel, annonce une nouvelle série de tests et mesures sur site qui permettront de valider et affiner des méthodes en travaillant sur un équipement de très bonne qualité, tant sur le plan de

la mécanique que de l'architecture de commande.

Les premiers résultats d'identification sur le prototype H4 ouvrent la voie à l'implantation de commandes avancées.

REFERENCES

- [1] G. Gogu, Families of 6R orthogonal robotic manipulators with only isolated and pseudo-isolated singularities, In *Mechanism and Machine Theory*, 37 (2002), pp. 1347-1375.
- [2] W. Khalil, S. Guegan, "A novel solution for the dynamic modeling of Gough-Stewart manipulators", IEEE Robotics and Automation Conference, Washington, mai 2002, pp. 817-822.
- [3] S. Guegan, W. Khalil, "Dynamic modeling of the Orthoglide", *Advances in Robot Kinematics*, Kluwer Academic Publishers, juin 2002, pp. 387-396.
- [4] F. Marquet, O. Company, S. Krut, F. Pierrot, "Enhancing Parallel Robot Accuracy ...", IEEE ICR&A 2002, pp. xx-yy.
- [5] Chablat D., Wenger Ph. et Merlet J-P, "Workspace Analysis of the Orthoglide using Interval Analysis", 8th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, Kluwer Academic Publishers, Caldes de Malavella, Espagne, Juin 2002
- [6] Chablat D. et Wenger Ph, "Design of a Three-Axis Isotropic Parallel Manipulator for Machining Applications: The Orthoglide", Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, October 3 - 4, Québec, Québec, Canada, 2002.
- [7] Vivas A., Poignet Ph., F. Marquet, F. Pierrot, Gautier M., "Experimental Dynamic Identification of a Fully Parallel Robot", soumis à ICRA'03
- [8] P. Renaud, N. Andreff, M. Dhome & P. Martinet, « Caractérisation des défauts géométriques d'un axe UTGV par vision ». 4èmes Assises Machines et usinage grande vitesse, Lille, Mars 2002.
- [9] P. Renaud, N. Andreff, M. Dhome & P. Martinet "Experimental Evaluation of a Vision-based Measuring Device for Parallel Machine-tool Calibration", IROS'02, Lausanne, Octobre 2002.
- [10] P. Renaud, N. Andreff, F. Marquet & P. Martinet, « Etalonnage géométrique d'un mécanisme parallèle de type H4 par vision », 16èmes JJCR 2002, Lyon, Octobre 2002.
- [11] P. Renaud, N. Andreff, F. Marquet & P. Martinet, "Vision-based kinematic calibration of a H4 parallel mechanism" Soumis à ICRA'03, Taipei, Taiwan, May 2003.
- [12] Krut S., Company O., Marquet F., Pierrot F., Twice: A Tilting Angle Amplification System for Parallel Robots, in IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, Washington, USA, May 2002
- [13] Marquet F., Company O., Krut S., Gascuel O., Pierrot F., Control of a 3-Dof Over-Actuated Parallel Mechanism, to appear in ASME International Design Engineering Technical Conferences and the Computers and Information in Engineering Conference (DETC/CIE), Montreal, CANADA, September 29 to October 2, 2002
- [14] Marquet F., Company O., Krut S., Pierrot F., Enhancing Parallel Robots Accuracy with Redundant Sensors, in IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, Washington, USA, May 2002
- [15] Chablat D., Caro S., Wenger Ph. et Angeles J., "The Isoconditioning Loci of Planar Three-DOF Parallel Manipulators", 29th Design Automation Conference, ASME, Montréal, Septembre-Octobre, 2002.