Manuscrit auteur, publié dans "Journal Européen des Systèmes Automatisés 44, 8 (2010) 887-911"
DOI : 10.3166/JESA.44.887-911

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

Commande Vision/Force de Robots Parallèles

Saliha Bellakehal[*] — Nicolas Andreff[/*] — Youcef Mezouar[*] — Mohamed Tadjine[***]**

[*] *LASMEA, Université Blaise Pascal/CNRS, Campus des Cézeaux, 24 avenue des Landais, 63177 Aubière Cedex, France.*

Firstname.Lastname@lasmea.univ-bpclermont.fr

[**] *Institut FEMTO-ST, CNRS/Université de Franche-Comté/ENSMM/UTBM, 24 rue Alain Savary, 25000 Besançon, France.*

Nicolas.Andreff@femto-st.fr

[***] *Laboratoire de Commande des Processus (LCP), Ecole Nationale Polytechnique, 10, avenue Pasteur, Hassan Badi, BP 182, El Harrach, Alger, Algérie.*

mohamed.tadjine@enp.edu.dz

RÉSUMÉ. *La commande position/force des machines à cinématique parallèle est étudiée dans cet article. Une architecture de commande référencée capteurs est présentée. Celle-ci est basée sur une commande par couple calculé dans l'espace cartésien permettant l'asservissement simultané de la pose cartésienne et des efforts de contact effecteur/environnement directement dans l'espace de la tâche. L'originalité de l'approche réside dans l'integration d'un système de vision comme outil de mesure de pose à une commande en effort d'un robot parallèle.*

ABSTRACT. *In this paper, force and position control of parallel kinematic machines is discussed. Cartesian space computed torque control is applied to achieve force and position servoing directly in the task space within a sensor based control architecture. The originality of the approach resides in the use of a vision system as an exteroceptive pose measurement of a parallel machine tool for force control purposes.*

MOTS-CLÉS : *Robots parallèles, commande en effort, commande parallèle, asservissement visuel.*

KEYWORDS: *Parallel robots, force control, parallel control, visual servoing.*

JESA. Volume 44 – n° 8/2010, pages 887 à 913

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

1. Introduction

Les machines à cinématique parallèle (ou robots parallèles) ont suscité un intérêt particulier de la communauté robotique durant ces dernières décennies. En effet, les limitations inhérentes à l'utilisation des architectures classiques dites sérielles, construites sur la base d'une chaîne cinématique ouverte, ont conduit les chercheurs et les industriels à s'orienter vers cette nouvelle classe de mécanismes structurellement différente dans laquelle l'effecteur est relié à la base par au minimum deux chaînes cinématiques indépendantes. Outre la précision élevée de ce type de structure lors du positionnement de l'effecteur, qui s'explique par le fait que les erreurs de positionnement relatives à chaque actionneur ne sont pas cumulées, les actionneurs des manipulateurs parallèles sont généralement fixés sur la base. Ceci a pour conséquence de réduire les effets inertiels sur la structure lorsque celle-ci est sollicitée dynamiquement et permet donc d'atteindre des vitesses de fonctionnement très élevées. Cependant, l'avantage principal des machines parallèles est sans doute leur rigidité accrue, comparé aux structures série, qui augmente sensiblement le rapport charge utile sur masse propre du robot. Cette propriété est très attractive pour les tâches impliquant une forte interaction entre l'effecteur du robot et l'environnement telles que les tâches d'insertion, de soudage, de vissage et toutes les opérations d'usinage. Pour toutes ces tâches, les efforts de contact doivent être maîtrisés sinon une éventuelle faible erreur de positionnement de l'outil peut engendrer des efforts qui peuvent croître de manière très importante, pouvant aller jusqu'à la destruction de la pièce ou de l'outil. La classe de commande dédiée à ce genre de taches est dite commande en effort. Plusieurs schémas de commande en effort des robots manipulateurs sériels ont été proposés dans la littérature. Pourtant, la commande en effort des robots parallèles a rarement été abordée. Ceci est dû au fait que, d'un côté, ces machines sont relativement récentes, et d'un autre côté, la complexité de leur structure mécanique rend très difficile leur modélisation dynamique et géométrique, notamment le calcul du modèle géométrique direct (MGD) donnant la position et l'orientation de l'organe terminal en fonction des coordonnées articulaires d'une machine parallèle revient à résoudre un système d'équations non linéaires d'ordre élevé qui n'a pas de solution analytique unique et dont la résolution numérique fait appel à des algorithmes itératifs. Lorsqu'il s'agit de réaliser la commande dans l'espace opérationnel où les trajectoires désirées sont naturellement décrites, le calcul de la pose se révèle indispensable. Par ailleurs, les commandes en effort impliquent nécessairement la prise en compte de la dynamique de la structure mécanique du robot qui – pour une machine parallèle – est naturellement décrite dans l'espace cartésien et calculée en fonction des variables opérationnelles. Par conséquent, il est plus commode de développer la commande position/force d'un robot parallèle directement dans l'espace de la tâche si l'on dispose d'une estimation suffisamment précise des variables opérationnelles. La vision artificielle comme outil de mesure exteroceptive de pose, constitue sans doute une alternative très attirante pour l'obtention directe des valeurs des variables opérationnelles du robot sans passer par le calcul complexe du MGD d'une machine parallèle. En particulier, les systèmes de vision ont montré une excellente efficacité à guider un robot dans l'espace cartésien en utilisant des informations visuelles (asservissement visuel). L'idée de couplage vi-

sion/force a déjà été appliquée pour les structures série. Cependant, elle n'a pas été exploitée auparavant (à notre connaissance) pour la commande position/force d'un robot parallèle.

Le présent travail s'inscrit alors dans ce cadre. Il s'agit d'implémenter une loi de commande position/force pour un robot parallèle utilisant le modèle dynamique cartésien du robot et permettant d'asservir à la fois la pose cartésienne et les efforts de contact de l'effecteur avec son environnement. Le schéma de commande proposé est similaire à celui présenté dans (Chiaverini *et al.*, 1993) mais dans une approche référencée capteurs. Il comprend donc deux boucles en parallèle : une boucle de contrôle explicite de l'effort et une boucle de contrôle de la position par retour visuel. L'avantage majeur de ce schéma de commande est le contrôle simultané et explicite de l'effort et de la position directement dans l'espace de la tâche sans recourir au calcul de MGD. Aussi toute la dynamique du robot est compensée dans la loi de commande par le principe de découplage non linéaire. La section suivante rappelle brièvement les travaux précédents sur les commandes en effort, les particularités des machines parallèles et le couplage vision/force. La section 3 traite de la commande dynamique position/force des robots parallèles. Dans la section 4, les difficultés rencontrées dans le schéma de commande décrit précédemment et la solution proposée sont exposées. Une description du banc d'essai est donnée dans la section 5 et les résultats de simulation dans la section 6.

2. État de l'art

2.1. *Commande en effort*

Pour les tâches impliquant une forte interaction entre l'effecteur du robot et l'objet manipulé, la maîtrise des efforts de contact est cruciale. Différents schémas de commande ont été proposés à cet effet dans la littérature (voir (DeSchutter *et al.*, 1997) pour une vision globale). Les deux grandes classes des commandes en effort sont les commandes dites hybrides position/force dans lesquelles un asservissement de l'effort à une consigne désirée apparaît explicitement (Raibert *et al.*, 1981), et les commandes dites en impédance (Hogan, 1985) où le contrôle d'effort est implicite *via* la boucle de contrôle de position.

Le contrôle hybride partitionne les six degrés de liberté de l'espace de travail en deux sous-espaces orthogonaux complémentaires sélectionnés *a priori* selon une description idéalisée de la géométrie de l'environnement. Deux contrôleurs indépendants sont alors mis en parallèle, l'un effectue un contrôle de position pur selon certaines directions et l'autre assure un contrôle d'effort pur selon les directions restantes. Une matrice diagonale impose cette sélection et assure un découplage idéal des deux contrôleurs. Toutefois, la description géométrique de l'environnement n'est jamais parfaite, aussi elle peut changer durant les différentes phases de l'exécution de la tâche. Dès lors, une éventuelle erreur en effort sur une direction contrôlée en position ou en position sur une direction contrôlée en effort ne peut être corrigée puis-

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

qu'un seul contrôleur est actif selon une même direction. Une autre difficulté est liée aux opérations de commutation du mode de commande – effort ou position – selon une direction qui est toujours une opération délicate.

A l'opposé, la deuxième grande classe est basée sur une description purement dynamique de l'environnement. Un comportement compliant est imposé au robot en régulant son impédance mécanique de sortie de façon à éviter l'apparition d'efforts excessifs au contact. L'effort exercé par le robot sur l'environnement n'est pas contrôlé explicitement mais dépend de la position de l'effecteur et l'impédance du robot. Il est indirectement contrôlé en spécifiant au préalable une trajectoire de référence à imposer au robot. Cette dernière est déterminée selon les propriétés dynamiques (inertie, amortissement et raideur) de l'environnement. Le problème majeur rencontré avec cette stratégie est la difficulté de déterminer avec précision les paramètres dynamiques de l'environnement, ce qui conduit à définir une trajectoire de référence inexacte qui ne permet pas un contrôle précis de l'effort de contact.

D'autres approches ont été proposées à mi-chemin entre ces deux grandes classes pour combiner au mieux les avantages de l'une et de l'autre. La commande hybride externe position/force proposée par Perdereau (Perdereau *et al.*, 1993) est telle que la boucle de contrôle d'effort est fermée sur la boucle de contrôle de position permettant ainsi aux directions contrôlées en effort d'être également asservies en position. La commande hybride parallèle (ou commande implicite en effort) proposée par Chiaverini (Chiaverini *et al.*, 1993) a, elle, l'avantage d'asservir explicitement position et effort par deux boucles en parallèle actives simultanément sans aucune matrice de sélection.

2.2. *Robots parallèles*

Les mécanismes à structure cinématique parallèle sont dotés d'une plus grande rigidité relativement à leurs masses et leurs tailles, une inertie réduite et de meilleures propriétés dynamiques que les structures sérielles classiques. Ces dernières années, les manipulateurs parallèles ont commencé à attirer l'attention des mécaniciens et des roboticiens en tant qu'alternative possible aux structures sérielles. En effet, les stratégies de commande en effort citées précédemment qui sont développées essentiellement pour les robots sériels ont été étendues aux robots parallèles dans certains travaux. Ainsi, le contrôle hybride a été appliqué aux machines parallèles (Merlet, 1988) ; (Satya *et al.*, 1995), tout comme l'approche par impédance (Amirat *et al.*, 1991) ; (Fasse *et al.*, 1998) ; (Bruzzone *et al.*, 2002) ; (Caccavale *et al.*, 2003), la commande hybride externe (Saadia *et al.*, 1997) ; (Fraisse *et al.*, 2007) et la commande hybride parallèle (Callegari *et al.*, 2003) ; (Huang *et al.*, 2007).

Néanmoins, le problème de la commande en effort des robots parallèles reste très peu abordé en raison des difficultés spécifiques à ces machines telles que leur espace de travail limité et le fort couplage entre le mouvement des différentes chaînes qui augmente la complexité de leurs modèles. Les problèmes liés à la conception et à la

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

modélisation ont été abondamment traités (Dasgupta *et al.*, 1998) ; (Merlet, 1999) ; (Khalil *et al.*, 2002) ; (Muller *et al.*, 2001) ; (Tarokh, 2007) et quelques problèmes ont pu être résolus. Cependant, le problème majeur de ces machines reste le calcul du modèle géométrique direct (MGD) qui consiste à trouver la pose possible de l'effecteur pour une configuration donnée des coordonnées articulaires. Le MGD des machines parallèles est en effet plus complexe que son dual : le modèle géométrique inverse des robots sériels. Généralement, des méthodes itératives (par exemple, Newton-Raphson) sont appliquées pour résoudre numériquement les équations non linéaires du MGD en partant d'une solution initiale estimée. En pratique, ces méthodes convergent parfois vers une solution qui ne correspond pas à la pose courante de l'effecteur. Par ailleurs, les approches analytiques ne sont possibles que pour des cas très restreints d'architectures cinématiques. Dans le cas général, la résolution analytique du MGD d'une machine parallèle revient à résoudre des équations polynomiales d'ordre élevé (40 pour la plate-forme de Gough). Ces difficultés contrarient une exploitation réelle et efficace de ces machines dans plusieurs domaines d'applications industrielles alors que théoriquement, elles sont qualifiées de supérieures par rapport aux machines série en termes de précision, rigidité et rapidité.

2.3. *Couplage vision/force*

Pour pallier au problème complexe du calcul du MGD d'un robot parallèle, une alternative captivante consiste à recourir à une mesure directe de la pose par un moyen de mesure exteroceptive qui – contrairement à l'approche modèle – n'impose aucune restriction sur la géométrie de la machine. Dans cette optique, la vision artificielle est une solution très attrayante. L'idée d'élaborer une commande référencée vision pour le suivi de trajectoires dans l'espace cartésien par un robot parallèle a été adoptée dans (Paccot *et al.*, 2007) ; (Ait-Aider *et al.*, 2006). Le couplage d'une commande référencée vision avec un retour d'effort pour un robot parallèle n'as pas été évoqué dans la littérature. Cependant, pour les structures classiques sérielles, la combinaison d'un asservissement visuel avec un retour d'effort s'est montrée bénéfique depuis 1973 lorsqu'une tâche d'insertion a été réalisée par asservissement visuel (Shirai *et al.*, 1973). Ainsi, l'intégration de ces deux modalités sensorielles a très tôt suscité l'intérêt de la communauté robotique : les caméras comme moyen de perception permettant au robot d'inspecter son environnement sans contact physique par analogie avec la vision humaine, et de l'autre côté, le capteur d'effort permettant de percevoir les interactions au contact du robot avec son environnement et restituer le sens de toucher, ce qui permet de protéger l'outil et l'objet contre la détérioration et de corriger les imprécisions de positionnement. Cette complémentarité a été exploitée dans (Morel *et al.*, 1998) par exemple pour réaliser une tâche d'insertion (*peg-in-a-hole*) : une boucle d'asservissement visuel 2D est fermée autour d'une boucle de commande en impédance (réduite à un simple terme d'amortissement). La sortie de l'asservissement visuel (un torseur de vitesse) est intégrée pour donner la trajectoire de référence à la commande en impédance. Cette même approche est adoptée dans (Pomares *et al.*, 2007) avec une impédance de seconde ordre. Les théories de la commande hybride position/force ont

été adoptées dans (Nelson *et al.*, 1995) en substituant la boucle de contrôle de position par une boucle d'asservissement visuel 3D qui permet une approche rapide de l'effecteur vers la surface de contact et donne une information précise sur la proximité de l'outil par rapport à la pièce manipulée. Toujours en utilisant l'approche hybride, Beaten *et al.* (Baeten *et al.*, 2000) ; (Baeten *et al.*, 2003) utilisent le formalisme du repère de la tâche (*task frame formalism*) introduit par (Masson, 1981) pour combiner vision et force dans un contrôleur approprié pour le suivi d'un contour plan inconnu. Un modèle du contour est calculé en ligne en utilisant les informations visuelles puis est injecté en amont de la boucle du contrôle d'effort pour améliorer les performances de poursuite.

Dans le présent travail, le couplage vision/force pour les robots parallèles est abordé. Une commande hybride parallèle vision/force composée d'une boucle d'asservissement de position cartésienne par retour visuel et d'une commande en effort dans l'espace de la tâche est proposée. Cette commande nécessite, comme nous allons le voir dans la suite, le développement du modèle dynamique cartésien du robot.

3. Formulation de la loi de commande

La commande par découplage non linéaire est une excellente approche qui permet la prise en compte des forces d'interaction dynamique lorsque des évolutions rapides du robot sont exigées (Raibert, 1978). Cette approche peut aussi bien être appliquée en espace articulaire ou en espace cartésien. Cependant, la commande en espace articulaire est incompatible avec les tâches contraintes qui impliquent le contrôle simultané de la position et de l'effort de contact (Khatib, 1993). En effet, les algorithmes de commande en effort doivent prendre en compte les interactions dynamiques entre l'effecteur et l'objet manipulé au niveau de l'espace de la tâche pour aboutir à une commande avec de bonnes performances. Dans (Paccot *et al.*, 2007), il a été montré que la commande dynamique des robots parallèles dans l'espace cartésien est la plus adéquate. En effet, la dynamique d'une machine parallèle est naturellement décrite dans l'espace cartésien (Dasgupta *et al.*, 1998). De plus, les variables à commander (la pose et l'effort de contact) sont aisément décrites dans l'espace de la tâche. Dans cette optique, un découplage non linéaire dans l'espace cartésien pour un robot parallèle a été proposé par Callegari (Callegari *et al.*, 2003) dans le cadre d'une architecture de contrôle hybride parallèle position/force (figure 1) similaire à celle proposée dans (Chiaverini *et al.*, 1993).

Dans ce schéma, la loi de commande est exprimée explicitement en fonction de la pose et de la vitesse cartésiennes de l'effecteur comme suit. Soit x l'ensemble des coordonnées généralisées indépendantes décrivant la pose cartésienne de l'effecteur. En prenant en compte l'effort F, défini dans l'espace de la tâche, d'interaction avec l'environnement, l'équation décrivant la dynamique du robot dans l'espace cartésien s'écrit :

$$A_x(x)\ddot{x} + C_x(x,\dot{x}) + G_x(x) + F + D^t_{inv}(x)\Gamma_f = \Gamma_x \qquad [1]$$

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

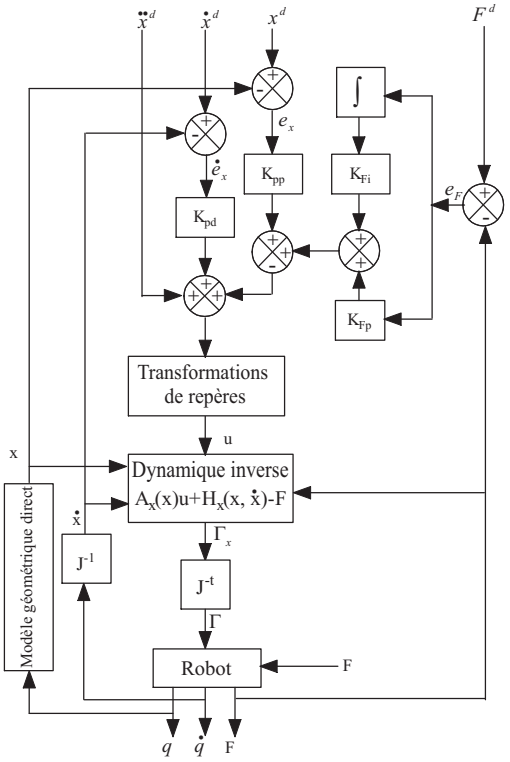


Figure 1. *Le schéma de commande hybride parallèle position/force adopté par Callegari*

avec

$$\Gamma_x = D_{inv}^{t}(x)\Gamma, \;\; \Gamma = D_{inv}^{-t}(x)\Gamma_x \qquad [2]$$

Dans ces expressions, $A_x(x)$ est une matrice symétrique définie positive représentant l'inertie cartésienne du robot, $C_x(x, \dot{x})$ est un vecteur représentant les efforts centrifuges et de Coriolis cartésiens, $G_x(x)$ est le vecteur des efforts de gravité dans l'espace cartésien, Γ_f représente les forces de frottements dans l'espace cartésien, Γ est le vecteur des couples/forces des actionneurs au niveau articulaire et Γ_x sa projection dans l'espace cartésien, $D_{inv}(x)$ est la matrice cinématique inverse du robot. En effet, pour les robots parallèles, cette matrice s'obtient en général aisément à partir du modèle géométrique inverse analytique :

$$q = MGI(x) \qquad [3]$$

d'où, par dérivation formelle :

$$\dot{q} = \frac{\partial MGI(x)}{\partial x}\dot{x} \qquad [4]$$

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

La matrice cinématique directe $D_{inv}^{-1}(x)$ s'obtient par inversion numérique. Sous l'hypothèse que le modèle du robot est parfaitement connu, l'application de l'approche de découplage dynamique non linéaire (Khatib, 1987) aux équations de mouvement [1] donne alors la loi de commande suivante :

$$\Gamma_x = \hat{A}_x(x)u + \hat{C}_x(x,\dot{x}) + \hat{G}_x(x) + \hat{F} + D_{inv}^t(x)\hat{\Gamma}_f \qquad [5]$$

où $\hat{A}_x$, $\hat{C}_x$, $\hat{G}_x$, $\hat{F}$ et $\hat{\Gamma}_f$ sont les valeurs estimées en $(x,\dot{x})$ de A_x, C_x, G_x, F et Γ_f respectivement. En portant [5] dans [1] on a :

$$\ddot{x} = u \qquad [6]$$

qui est un système linéaire découplé de second ordre. L'entrée de commande auxiliaire u est choisie comme la somme des deux commandes de position et d'effort :

$$u = u_p + u_f \qquad [7]$$

On peut alors prendre pour les boucles de commande de position et d'effort respectivement des contrôleurs PD et PI (figure 1) :

$$u_p = \ddot{x}^d + K_v(\dot{x}^d - \dot{x}) + K_p(x^d - x) \qquad [8]$$

$$u_f = K_f(F^d - F) + K_i \int_0^t (F^d - F)d\tau \qquad [9]$$

où K_v s'exprime en s^{-1}, K_p en s^{-2}, K_f en kg^{-1} et K_i en $kg^{-1}s^{-1}$ et où x^d, $\dot{x}^d$, $\ddot{x}^d$ et F^d sont respectivement les valeurs désirées de la position cartésienne, de sa dérivée première, de sa dérivée seconde et de l'effort de contact. La loi de commande qui en résulte peut alors s'écrire :

$$\begin{aligned}\Gamma_x = \hat{A}_x(x)[\ddot{x}^d + K_v(\dot{x}^d - x) + K_p(x^d - x) + K_f(F^d - F) \\ +K_i \int_0^t (F^d - F)d\tau] + \hat{C}_x(x,\dot{x}) + \hat{G}_x(x) + \hat{F} + D_{inv}^t(x)\hat{\Gamma}_f\end{aligned} \qquad [10]$$

Ce choix permet un contrôle explicite et simultané de la pose cartésienne et des efforts de contact directement dans l'espace opérationnel. Chaque degré de liberté peut être contrôlé à la fois en position et en effort avec une prédominance de la boucle d'effort apportée par l'action de l'intégrateur.

4. Commande vision/force

Dans le schéma de commande de la figure 1, le calcul du modèle géométrique direct du robot parallèle est nécessaire pour le calcul de la loi de commande. Comme mentionné précédemment, ce modèle n'est disponible sous forme analytique que pour des cas très particuliers de mécanismes parallèles. Dans le cas général, des méthodes

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

itératives permettant l'obtention d'une solution numérique sont utilisées. Ces méthodes peuvent converger vers une solution qui ne correspond pas à la pose réelle du robot en raison des différentes erreurs auxquelles le modèle est sujet et des erreurs d'arrondi introduites lors de la résolution numérique. Pour contourner cette difficulté, l'idée proposée est de remplacer le calcul du MGD (qui consiste à résoudre un système d'équations non linéaires d'ordre élevé) par une mesure extéroceptive directe de la pose de l'effecteur. En effet, dans le schéma de commande présenté à la figure 1, la boucle de commande en effort référencée capteurs est couplée avec la boucle de commande de position référencée modèle conduisant à une architecture non homogène. De plus, la présence d'un modèle estimé numériquement dans la boucle de retour peut nuire à la stabilité, la fiabilité et la précision de la commande outre son coût calculatoire. Il est également à noter qu'une commande référencée modèle est par nature, moins robuste vis-à-vis des erreurs de modèle inévitablement présentes. D'un autre côté, l'utilisation d'une mesure extéroceptive pour la pose cartésienne réduit toutes les erreurs potentielles à une seule origine qui est l'erreur de mesure, cette dernière étant directement traitée par le contrôleur. Dans ce cas, en plus de la réduction du coût calculatoire, toutes les incertitudes dues aux erreurs sur les paramètres de la machine et aux jeux mécaniques présents dans les nombreuses liaisons n'affecteront plus la commande, puisqu'aucun modèle n'est présent dans la boucle de retour. De plus, et contrairement au schéma de la figure 1, la pose et les efforts de contact sont traités d'une manière similaire au niveau du contrôleur dans une architecture homogène puisque les deux grandeurs sont asservies dans l'espace opérationnel par deux boucles référencées capteurs. Finalement, il est clair qu'il faut pouvoir mesurer la pose cartésienne de l'effecteur dans l'espace opérationnel pour satisfaire les exigences des applications où l'effecteur doit évoluer à grande vitesse et interagir fortement avec l'environnement. Pour cela, plusieurs moyens de mesure sont envisageables (figure 2) :

– **système à câbles :** Un certain nombre de câbles sont connectés à l'effecteur du robot et la pose est estimée par résolution du problème géométrique direct. Le système nommé CaTraSys (Tavolieri *et al.*, 2006) construit sur une cinématique de type Gough en est un exemple. Cette technique est à coût très réduit mais n'est pas sans risque, les câbles pouvant envelopper l'effecteur. De plus, cet ensemble de câbles forme une structure cinématique parallèle. On remplace donc le calcul du MGD d'un robot parallèle par le calcul du MGD d'un autre robot parallèle ;

– **dispositif mécanique :** Un mécanisme série est mis en parallèle avec le robot parallèle de façon à ce que leurs poses soient identiques (par exemple, les bras Faro ou Romer), la pose du mécanisme ajouté est calculée en utilisant le modèle géométrique direct bien connu des robots sériels. Le dispositif mécanique ajouté peut éventuellement avoir une architecture parallèle comme la plate-forme de Gough-Stewart (Corbel *et al.*, 2008). Cette méthode est très limitative dans la mesure où le mécanisme ajouté doit être assez léger pour limiter l'effet de son inertie sur la dynamique du robot parallèle. Ceci rend sa structure sujette aux flexions, ce qui conduit à une estimation biaisée de sa pose. D'autre part, en utilisant le MGD du mécanisme, on ne peut pas avoir une redondance d'informations puisque le nombre de variables mesurées est égal au nombre d'inconnues (système carré) ;

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

– **interféromètre laser :** Cet outil de mesure sans contact peut guider précisément le robot à hautes fréquences lorsqu'il est bien étalonné. Par contre, son coût est très élevé et son utilisation est très restrictive vu sa sensibilité aux effets de l'environnement, notamment, son faisceau lumineux ne doit pas être interrompu. De plus, la mesure de l'orientation par cet outil n'est pas aussi précise que la mesure de la position ;

– **système de vision :** Un système de vision nécessite un étalonnage mais il convient à toutes les situations, facile à utiliser, pas cher, n'impose aucune restriction sur la cinématique du robot et peut être plus précis puisqu'il permet facilement l'obtention d'une redondance d'information. De plus, c'est un outil de mesure sans contact qui n'affecte pas la structure du robot.

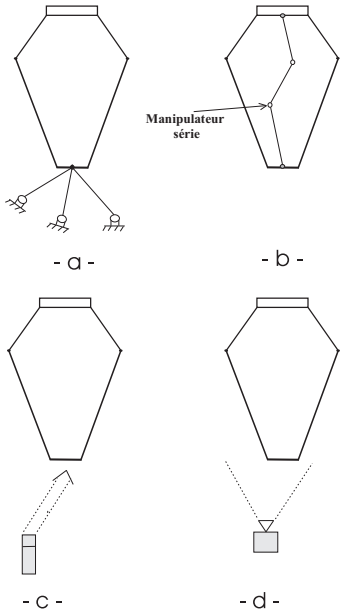


Figure 2. *Les differents outils de mesure de pose cartésienne :a) système à câbles, b) dispositif mécanique, c) interféromètre laser et d) système de vision*

Vu le progrès continu dans l'efficacité des algorithmes de traitement d'image et les avancées récentes réalisées dans les technologies d'acquisition d'image, la vision constitue un capteur adéquat que nous proposons d'utiliser pour la mesure de pose de l'effecteur. De cette manière, le schéma de commande position/force proposé par Callegari (figure 1) peut être réduit à celui de la figure 3 dans lequel aucun calcul du MGD n'est requis. Dans ce schéma, la pose et l'effort de contact sont contrôlés dans l'espace opérationnel au moyen de deux boucles de commande à retour sensoriel actives en parallèle. Comme mentionné précédemment, cette solution s'est très tôt montrée bénéfique pour la commande position/force des robots sériels en raison de la complémentarité entre les deux capteurs. Dans le cas des robots parallèles, le couplage

vision/force est encore plus avantageux puisqu'il permet, en plus, d'éluder la difficulté du calcul du MGD et de compenser les erreurs dues à la présence de plusieurs chaînes et liaisons passives dans une structure parallèle.

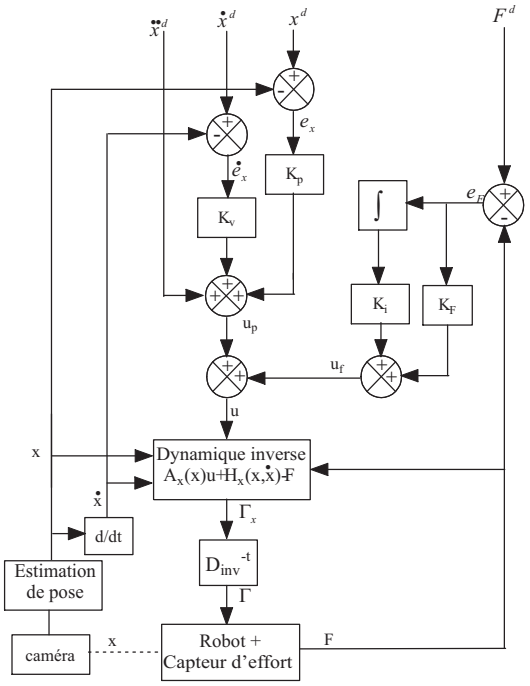


Figure 3. *Le schéma de commande vision/force proposé*

Il est important de noter qu'un système de vision peut également fournir une mesure de la vitesse cartésienne (Ait-Aider *et al.*, 2006). Des travaux plus récents dans notre laboratoire (Dahmouche *et al.*, 2008) utilisent une stratégie basée sur l'acquisition de sous-parties de l'image (régions d'intérêt) dans le but de réduire la densité des données transmises et améliorer la fréquence de calcul de pose. Une fréquence estimée à 333 Hz a été réalisée expérimentalement avec une erreur moyenne de 0,32 pixels en statique et 0,54 pixels en dynamique. Par conséquent, aucune différentiation numérique n'apparaît dans le schéma de commande. Ainsi, en exploitant adéquatement la densité d'informations que fournit un système de vision, celui-ci peut assurer la fonction de deux capteurs à la fois : un capteur de pose et un capteur de vitesse.

5. Description du banc d'essai

Le schéma de commande proposé illustré à la figure 3 a été testé en simulation sur le robot parallèle Orthoglide. Il s'agit d'une machine parallèle à 3 degrés de liberté de type delta conçue à l'IRCCyN (figure 4) et dédiée aux applications d'usinage 3 axes

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

(Majou *et al.*, 2002). La cinématique de base 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 (figure 4), chacune est composée de quatre liaisons de type PRPaR (P : glissière, R : pivot, Pa : parallélogramme).

a) 

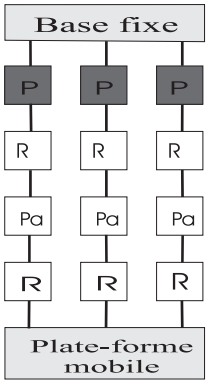
b) 

Figure 4. *Vue globale de l'Orthoglide (a) et ses chaînes cinématiques (b)*

Ses performances maximales en vitesse et en accélération sont respectivement $1,2\ m/s$ et $20\ m/s^2$. L'espace de travail peut être représenté par un cube de 200 mm de côté avec une homogénéité des performances dans tout le volume de travail et dans toutes les directions. Ce robot a aussi l'avantage d'avoir un MGD défini analytiquement par des équations du second ordre seulement (Pashkevich *et al.*, 2006) qui s'écrit, sous l'hypothèse de perpendicularité des trois axes moteur :

$$\begin{cases} X_e = P_2 + t/P_2 \\ Y_e = P_3 + t/P3 \\ Z_e = P_1 + t/P_1 \end{cases} \qquad t = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - AC}}{A} \qquad [11]$$

où $P_i = \frac{1}{2}(-a + q_i + D_6)$ pour $i = 1, 2, 3$, $A = \sum_{i=1}^{3} P_i^{-2}$, $C = (\sum_{i=1}^{3} P_i^2) - D_4^2$ et a, D_4 et D_6 sont des paramètres géométriques. Le modèle cinématique liant les vitesses articulaires à la vitesse de l'effecteur (vitesse opérationnelle) est donné par :

$$D_{inv}(X) = \begin{pmatrix} \frac{X_e}{\Delta_1} & \frac{Y_e}{\Delta_1} & 1 \\ 1 & \frac{Y_e}{\Delta_2} & \frac{Z_e - a}{\Delta_2} \\ \frac{X_e}{\Delta_3} & 1 & \frac{Z_e - a}{\Delta_3} \end{pmatrix} \qquad [12]$$

où :

$$\Delta_1 = \sqrt{D_4^2 - X_e^2 - Y_e^2}$$

$$\Delta_2 = \sqrt{D_4^2 - Y_e^2 - (Z_e - a)^2}$$

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

$$\Delta_3 = \sqrt{D_4^2 - X_e^2 - (Z_e - a)^2}$$

Le schéma de commande de la figure 3 requiert le calcul du modèle dynamique cartésien du robot. En se basant sur la méthode formulée par Khalil (Khalil *et al.*, 2007), la dynamique de la plate-forme est calculée en fonction des variables cartésiennes x, $\dot{x}$ et $\ddot{x}$, tandis que la dynamique des jambes est calculée en fonction des variables articulaires q, $\dot{q}$ et $\ddot{q}$. Par conséquent, la dynamique de l'ensemble plate-forme plus les jambes est représentée par :

$$\Gamma = D_{inv}^{-t}(x)[F_p + \sum_{i=1}^{3} J_{pi}^t J_i^t H_i] + \Gamma_f \quad [13]$$

où F_p est un terme qui représente la dynamique de la plate-forme mobile, J_{pi} est une matrice jacobienne reliant les coordonnées cartésiennes de l'extrémité de la jambe i aux coordonnées cartésiennes de l'effecteur, J_i est la matrice jacobienne représentant la cinématique série de la jambe i, Γ_f est le terme des forces de friction, H_i représente la dynamique inverse de la jambe i et peut être calculé par l'une des méthodes bien connues du calcul de la dynamique des architectures sérielles. Le terme des forces de friction Γ_f est composé des forces de frottements visqueux Γ_{fv} et secs Γ_{fs} :

$$\Gamma_f = \Gamma_{fv} + \Gamma_{fs}$$

$$= F_v\dot{q} + F_s sign(\dot{q})$$

où F_v et F_s sont les paramètres de frottement visqueux et secs respectivement.

Le formalisme de Newton-Euler est utilisé pour obtenir les équations de la dynamique de la plate-forme mobile. En supposant que l'effecteur est au contact avec l'environnement et y exerce un effort F, la dynamique de la plate-forme est donnée par l'équation suivante :

$$F_p = m_p\ddot{x} - m_p I_3 G + F \quad [14]$$

où :

– m_p : est la masse de la plate-forme ;

– I_3 : est la matrice identité 3×3 ;

– G : est l'accélération de la pesanteur ;

– F : est l'effort exercé par l'effecteur sur l'environnement.

Il est à noter que dans (Khalil *et al.*, 2007), l'effort de contact F entre l'effecteur et l'environnement n'est pas considéré et le robot est supposé se mouvoir en espace libre. Cependant, le mouvement au contact est pris en compte dans le présent travail et la surface avec laquelle l'effecteur interagit est modélisée par un ressort de raideur constante K_e. Le modèle de contact robot/environnement est alors donné par :

$$F = K_e \Delta X \quad [15]$$

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

où ΔX représente l'enfoncement de l'outil dans la surface de contact. Les expressions détaillées et la validation expérimentale des modèles géométrique, cinématique et dynamique de l'Orthoglide sont présentés dans (Paccot *et al.*, 2008). Dans ce qui suit, ces modèles seront utilisés pour simuler le comportement d'une machine parallèle avec la commande vision force présentée précédemment.

6. Simulation

6.1. *Environnement de simulation*

Le schéma de commande de la figure 3 a été implémenté dans un environnement MATLAB/SIMULINK [1] en utilisant les modèles et les paramètres présentés dans la section précédente. Tout au long de ces simulations, les paramètres dynamiques de la machine sont supposés déterminés avec une incertitude de 10 % et les paramètres géométriques sont connus avec une précision de $50\ \mu m$. L'axe de l'outil est supposé lié rigidement au centre de la plate-forme mobile et la surface de contact est fixée parallèlement au plan x-y du référentiel de base. Le modèle de contact est supposé avoir une dépendance linéaire force/déplacement comme exprimé dans l'équation [15] *via* la matrice de raideur qui est supposée avoir une forme diagonale :

$$K_e = I_3 k_e \qquad [16]$$

où le coefficient de la matrice de raideur est maintenu à la valeur :

$$k_e = 10^4 N.m^{-1}$$

La résolution du capteur d'effort adopté (le modèle Gamma de ATI) est égale à : $[\frac{1}{160}N, \frac{1}{160}N, \frac{1}{80}N, \frac{1}{32000}N.m, \frac{1}{32000}N.m, \frac{1}{32000}N.m]$.

Modèle de la caméra :

Le système de vision est constitué d'une seule caméra fixe déportée (voir figure 6). La caméra qui effectue des mesures visuelles sur 1024 x 1024 pixels est décrite par un modèle sténopé qui réalise une projection perspective d'un point métrique de coordonnées homogènes dans un repère attaché à l'objet observé $P = [\ X \quad Y \quad Z \quad 1\ ]^t$ en un point image exprimé dans le repère normalisé $p = [\ x \quad y \quad 1\ ]^t$ ou en pixels $m = [\ u \quad v \quad 1\ ]^t$. La transformation projective entre les coordonnées métriques et les coordonnées pixeliques est exprimée par :

$$p = \begin{bmatrix} I_{3\times3} & 0_{3\times1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{camera}R_{objet} & {}^{camera}t_{objet} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \qquad [17]$$

1. Une implantation alternative à celle que nous avons réalisée, probablement plus simple, repose sur la *Visual Servoing Toolbox for Matlab/Simulink*, http ://vstoolbox.sourceforge.net/.

avec $m = Kp$ où K est la matrice des paramètres intrinsèques de la caméra que l'on détermine lors d'une phase d'étalonnage qui se fait hors ligne.

Estimation de la pose :

L'estimation de la pose d'un objet observé par une seule caméra est possible si le modèle 3D de l'objet et les paramètres de la caméra sont disponibles. Dans notre simulation, l'objet observé est une mire 3D constituée de 16 points (figure 5) dont le modèle 3D est parfaitement connu.

La pose est estimée par la technique d'asservissement visuel virtuel qui consiste à faire déplacer une caméra virtuelle d'une position initiale m_i connue vers une position finale m_d qu'on doit déterminer (Marchand *et al.*, 2002). L'objectif est de minimiser au sens des moindre carrés l'erreur $\parallel m_i - m_d \parallel$ en minimimisant une fonction de tâche définie comme pour un asservissement visuel 2D classique par (Espiau *et al.*, 1992) :

$$e = C(m_i(K) - m_d) \quad [18]$$

où C est une matrice $6 \times k$ (k est le nombre d'informations visuelles choisies) de rang plein 6, dite matrice de combinaison.

Une solution qui permet de tenir en compte de la redondance d'information est de choisir (Chaumette *et al.*, 2006) :

$$C = L^{+} \quad [19]$$

où L^{+} est la pseudo-inverse de la matrice d'interaction associée aux informations visuelles choisies et calculée pour $m = m_d$. Dans le cas où l'on choisit des points comme primitives visuelles, la matrice d'interaction associé est donnée par :

$$L = \begin{bmatrix} -\frac{1}{z} & 0 & \frac{x}{z} & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & -\frac{1}{z} & \frac{y}{z} & 1+y^2 & -xy & -x \end{bmatrix} \quad [20]$$

La position finale après convergence correspond à la pose 3D recherchée. La convergence de ce problème d'optimisation est garantie si l'erreur initiale est suffisamment faible (Marchand *et al.*, 2002). Dans notre application, cette condition est largement vérifiée puisque les images de deux poses 3D successives sont très proches. Néanmoins, la toute première image initiale doit être suffisamment bien estimée. Pour assurer cela, l'algorithme de Dementhon (Dementhon *et al.*, 1995) est utilisé pour la toute première itération.

Pour simuler au mieux les conditions réelles de l'implémentation, trois cas de figures sont considérés :

– **Cas 1 :** Un système de vision grossièrement étalonné avec une résolution d'acquisition d'image de 0,1 pixels ;

– **Cas 2 :** Un système de vision très bien étalonné avec une résolution d'acquisition d'image de 0,05 pixels ;

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

– **Cas 3 :** Un système de vision avec une résolution d'acquisition d'image de 0,01 pixels est considéré. Ce système est quelque peu futuriste puisque cette résolution n'est actuellement réalisable qu'en statique.



Figure 5. *La mire 3D utilisée dans les simulations*

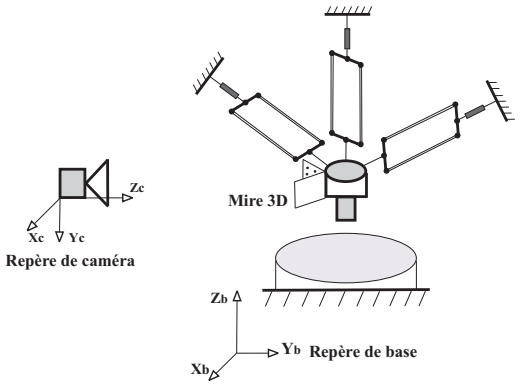
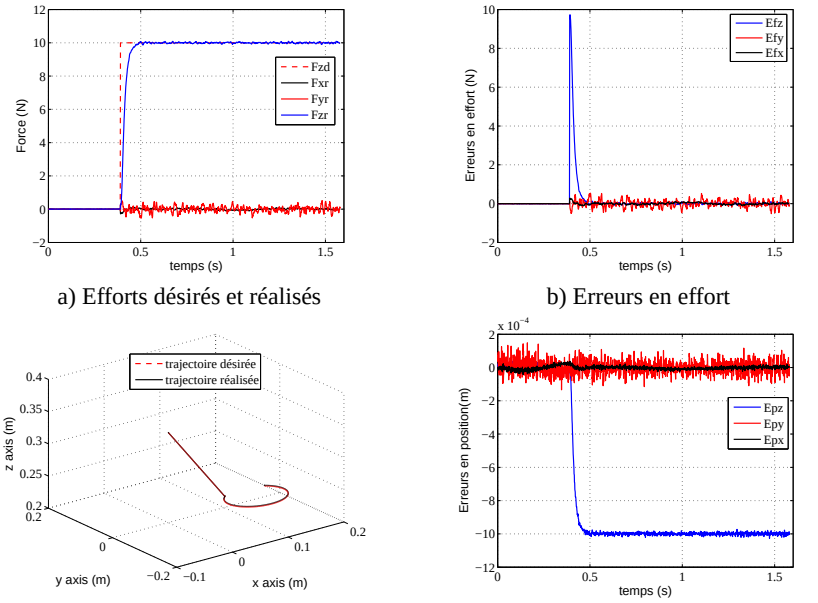


Figure 6. *L'environnement de simulation et les repères associés*

Dans une première étape, une mire 3D composée de 16 points (figure 5) est liée à l'effecteur sachant que dans (Dahmouche *et al.*, 2008), une estimation de pose et de vitesse cartésiennes a été réalisée expérimentalement à 333 Hz en observant 16 points. La surface de contact est fixée à $0,24\ m$ dans la direction de l'axe Z du référentiel de base (figure 6). L'effecteur, qui se trouve initialement à la position $x_0 = (0; 0; 0,34)^t$ par rapport au référentiel de base, doit parcourir une trajectoire circulaire de rayon $0,05\ m$ autour du centre $x_c = x_0 + [0,1; -0,1; -0,1]^t$ sur la surface de contact tout en y appliquant un effort normal constant de $10\ N$. La trajectoire de référence est générée avec les contraintes de vitesse maximale de $1,2m/s$ et d'accélération maximale $3\ m/s^2$ dans un premier temps. Les constantes de gain de la loi de commande (équation [10]) sont fixées pour tous les cas de figure aux valeurs suivantes : $k_p = 3(2\pi\omega)^2$, $k_v = 3(2\pi\omega), k_f = 0,05\omega$ et $k_i = 5\omega$ où ω est maintenue à $10\ rad/s$ sous une fréquence d'échantillonnage de 1 KHz.

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

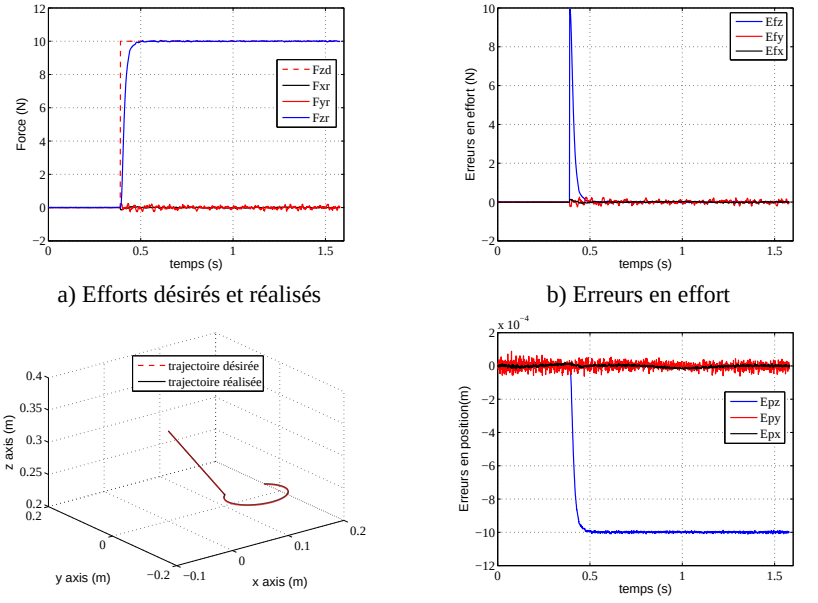
hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011



a) Efforts désirés et réalisés b) Erreurs en effort

c) Trajectoire cartésienne 3D désirée et réalisée d) Erreurs sur la position cartésienne

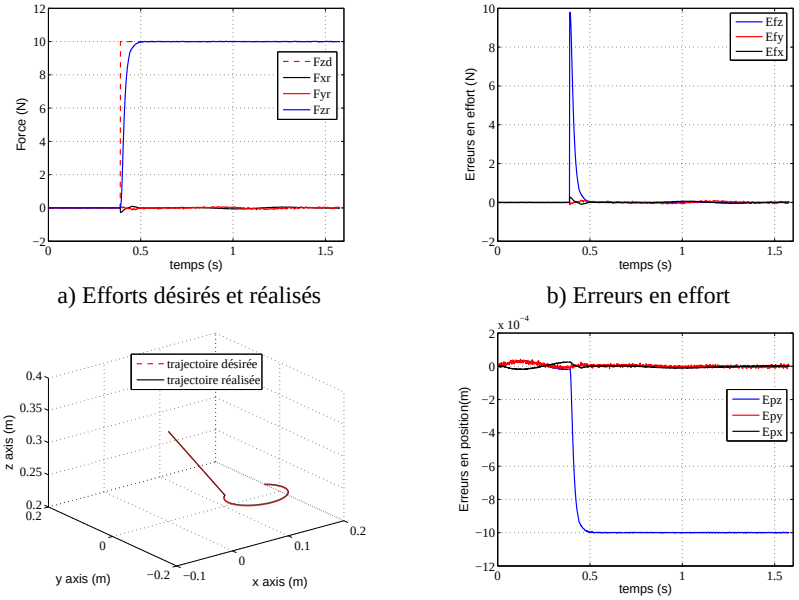
Figure 7. *Résultat obtenu dans le cas 1 avec une mire de 16 points*



a) Efforts désirés et réalisés b) Erreurs en effort

c) Trajectoire cartésienne 3D désirée et réalisée d) Erreurs sur la position cartésienne

Figure 8. *Résultat obtenu dans le cas 2 avec une mire de 16 points*



a) Efforts désirés et réalisés

b) Erreurs en effort

c) Trajectoire cartésienne 3D désirée et réalisée

d) Erreurs sur la position cartésienne

Figure 9. *Résultat obtenu dans le cas 3 avec une mire de 16 points*

6.2. *Résultats*

Dans chacune des figures 7 à 9, les sous-figures suivantes sont considérées : la sous-figure (a) représente les efforts de contact désirés (trait en pointillé) et réalisés (trait continu), la sous-figure (b) représente l'erreur absolue sur effort selon les trois axes X, Y et Z du référentiel de base, la sous-figure (c) représente la trajectoire 3D désirée (trait en pointillé) et réalisée (trait continu), enfin, les erreurs absolues sur la position selon les trois axes sont illustrées à la sous-figure (d). D'une manière générale, la loi de commande permet un très bon suivi en effort et en position avec un passage lisse de l'espace libre à l'espace contraint (à $t \approx 0,4s$) et des erreurs statiques nulles en effort et en position. Cependant, sur la direction Z (direction contrainte), une erreur résiduelle en position persiste. Ceci est dû au fait que l'effort est hiérarchisé par rapport à la position selon la direction commandée en effort. La valeur de cette erreur est proportionnelle à la raideur de la surface de contact et à l'effort normal appliqué.

Les figures 7a, 8a, 9a, 7b, 8b et 9b montrent la dependance entre la précision du capteur visuel et l'erreur de suivi en effort. En effet, dans le cas 1, l'erreur suivant les axes X et Z (correspondant au plan image) est inférieur à 0,2 N tandis qu'elle est de l'ordre de 0,4 N sur l'axe Y qui est perpendiculaire au plan image. En revanche, avec le système de vision du cas 2, cette erreur est de 0,1 N suivant les axes X et Z et 0,2 N

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

suivant l'axe Y. Enfin, dans le cas 3, l'erreur en effort est de 0,05 N sur les axes X et Z et 0,1 N sur l'axe Y.

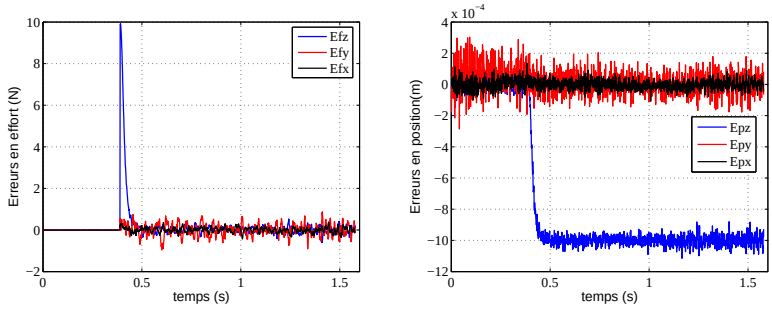


Figure 10. *Résultat obtenu dans le cas 1 avec une mire de 6 points : erreurs en effort (gauche), erreurs sur la position cartésienne (droite)*

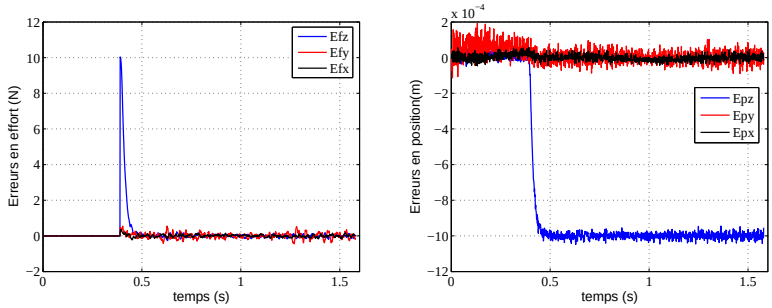


Figure 11. *Résultat obtenu dans le cas 2 avec une mire de 6 points : erreurs en effort (gauche), erreurs sur la position cartésienne (droite)*

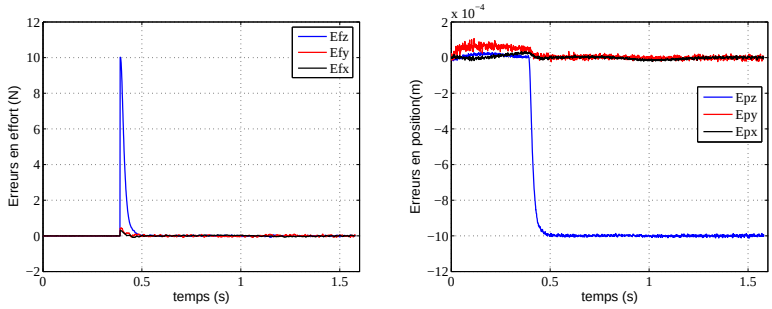


Figure 12. *Résultat obtenu dans le cas 3 avec une mire de 6 points : erreurs en effort (gauche), erreurs sur la position cartésienne (droite)*

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

Les figures 7c, 8c, 9c, 7d, 8d et 9d montrent que la boucle de position n'est pas affectée par la boucle d'effort et les trajectoires désirée et réalisée coincident complètement. L'erreur en position cartésienne sur les axes X et Z ne dépasse pas les $0,04\ mm$, $0,006\ mm$ et $0,002\ mm$ dans les cas 1, 2 et 3 respectivement. Sur l'axe Z en particulier, cette erreur après l'impact (à $t \cong 0,4s$) est autour d'une valeur nominale de $1mm$ qui représente un déplacement imposé de manière à maintenir l'effort de contact. Ce déplacement est proportionnel au rapport entre la raideur de l'environnement et l'effort imposé. Sur l'axe Y qui correspond à l'axe perpendiculaire au plan image (la profondeur), l'erreur est naturellement plus importante : elle atteint $0,12\ mm$ dans le cas 1, $0,06\ mm$ dans le cas 2 et $0,01\ mm$ dans le troisième cas. Donc même avec un système de vision à performances limitées, on peut atteindre des précisions acceptables grâce à la redondance d'information que l'on peut avoir aisément avec la vision.

Dans les figures 10, 11 et 12, les mêmes simulations ont été reproduites avec une mire composée de 6 points uniquement. En réduisant le nombre de points, la redondance d'informations est naturellement réduite mais des fréquences plus élevées sont atteignables. Les résultats obtenus pour le cas 2 sont assez précis : sur les axes X et Z, l'erreur en position ne dépasse pas les $0,04\ mm$, l'erreur en effort est de $0,2\ N$ sur l'axe Y, ces erreurs sont de l'ordre de $1\ mm$ et 0,4 N en position et en effort respectivement. Avec le système de vision du cas 3, on peut atteindre des précisions de 0,05 N et $0,02\ mm$ en effort et en position respectivement sur les axes parallèles au plan image et 0,15 N et $0,04\ mm$ suivant l'axe perpendiculaire au plan image. Avec un système de vision très précis et bien étalonné, on peux donc réduire le nombre de primitives visuelles pour atteindre des fréquences plus élevées tout en gardant les précisions requises.

Si le calcul de pose est réalisable à fréquence élevée, des mouvements plus rapides peuvent être imposés au robot. Le cas d'un mouvement plus sollicitant est donc examiné, la même trajectoire spatiale est réalisée avec une accélération maximale de $10\ m/s^2$. La figure 13 présente la norme de l'erreur en effort et en position respectivement avec une mire de 6 points (trait en pointillé) et une mire de 16 points (trait continu) pour les deux trajectoires temporelles considérées. On peut voir que le comportement du robot est similaire pour les deux sollicitations dans les cas où on utilise 6 points et 16 points. Les ondulations présentes dans la figure 13 (droite) sont dues à l'inertie du robot qui se manifeste plus à l'accélération maximale imposée de $10\,m/s^2$. Cette remarque est valable pour la figure 14 qui présente la norme de l'erreur en effort et en position respectivement avec le système de vision du cas 1 (trait en pointillé) et du cas 3 (trait continu) en utilisant une mire de 16 points pour les deux trajectoires temporelles considérées. Le comportement de la boucle de commande de position vis-à-vis de la variation de la précision du système de vision est similaire pour les deux sollicitations considérées, tandis que la boucle d'effort montre une plus grande sensibilité aux bruits de mesure liés à la précision du système de vision lorsque le robot est sollicité dynamiquement.

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

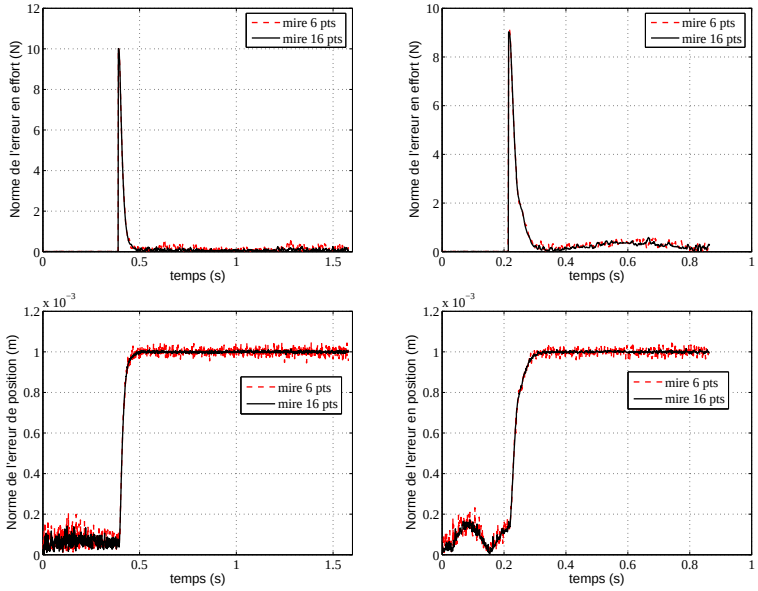


Figure 13. *Norme de l'erreur en effort (en haut) et en position (en bas) avec le système de vision du cas 2 : accélération maximale de* $3\ m/s^2$ *(gauche) et de* $10\ m/s^2$ *(droite)*

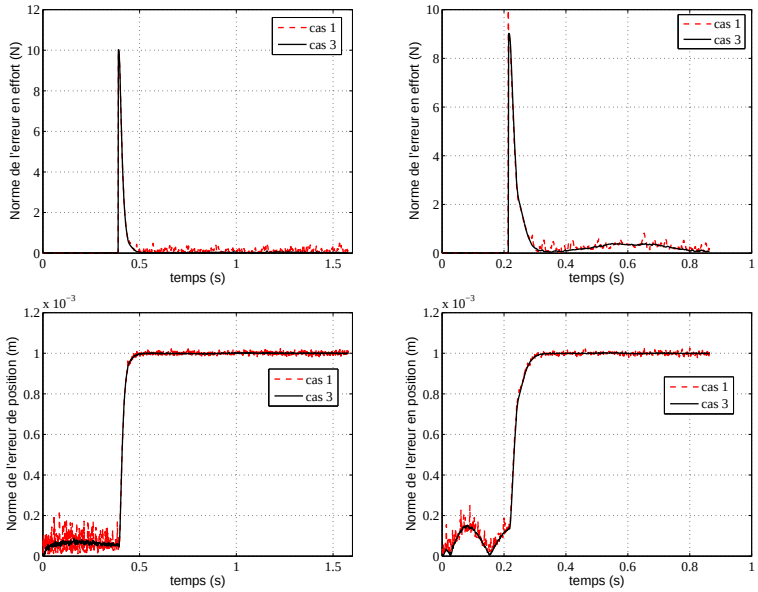


Figure 14. *Norme de l'erreur en effort (en haut) et en position (en bas) avec une mire de 16 points : accélération maximale de* $3\ m/s^2$ *(gauche) et de* $10\ m/s^2$ *(droite)*

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

De ce qui précède, on peut tirer les conclusions suivantes :

– la précision de l'estimation de la pose par vision est conditionnée par deux paramètres :

- le nombre de primitives observées qui augmente la redondance d'information ;

- la précision de l'acquisition et de l'étalonnage de la caméra ;

– l'amélioration de la fréquence de calcul de pose est conditionnée par les facteurs suivants :

- le nombre de primitives observées ;

- l'efficacité de l'algorithme de calcul de pose ;

- la rapidité d'acquisition d'image ;

- la puissance du calculateur ;

– lorsqu'un robot au contact est sollicité dynamiquement, la boucle de commande de l'effort est moins robuste vis-à-vis des bruits de mesure dus à l'acquisition que la boucle de commande de position.

7. Conclusion

Un schéma de commande position/force par retour visuel du robot parallèle Orthoglide au contact avec une surface rigide planaire a été proposé dans le présent travail. La commande hybride parallèle couplant un retour d'effort et un retour visuel avec compensation de la dynamique de la structure mécanique du robot a montré un bon suivi des deux consignes (position et effort) avec des systèmes de vision de différents niveaux de performances. L'utilisation d'un système de vision pour l'estimation directe de la pose cartésienne de l'effecteur comme alternative au calcul numérique du MGD d'une machine parallèle simplifie le calcul de la dynamique du robot parallèle en fonction des variables cartésiennes et permet l'asservissement explicite des variables à commander dans l'espace de la tâche. D'un autre côté, la compensation de toutes les erreurs du modèle inhérentes aux machines parallèles (les jeux mécaniques dans les nombreuses liaisons, erreurs dues aux flexions des jambes, erreurs d'alignement géométriques des axes, erreurs dues aux effets thermiques, etc.) est assurée avec ce capteur qui n'impose aucune restriction sur la complexité de la cinématique du robot. Les résultats obtenus incitent à l'adoption de la vision comme outil de mesure de pose vu les progrès déjà réalisés et attendus dans les puissances des calculateurs et dans les technologies d'acquisition et les algorithmes de traitement d'image ; des fréquences supérieures et des précisions meilleures sont alors envisageables. Dans une prochaine étape, la validation expérimentale de ce schéma de commande sur l'Orthoglide est envisagée. Par la suite, nous envisageons un schéma de commande où la boucle de la commande de position par mesure extéroceptive réalisée dans le présent travail sera remplacée par un asservissement visuel 2D. Ainsi, l'erreur entre la consigne et la pose

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

réelle de l'effecteur sera corrigée directement dans le repère capteur sans passer par un calcul de pose.

8. Bibliographie

Ait-Aider O., Andreff N., Martinet P., Lavest J.-M., « Simultaneous pose and velocity measurement by vision for high-speed robots », *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Orlando, Florida, p. 3742-3747, May 15-19, 2006.

Amirat Y., Artigue F., Pontnau J., « Force feedback control of a six DOF parallel robot : Application to assembly in car manufacturing », *Revue d'automatique et de productique appliquées*, vol. 4, n° 2, p. 109-121, 1991.

Baeten J., Bruyninckx H., De Schutter J., « Integrated vision/force robotic servoing in the task frame formalism », *Int. J. of Robotics Research*, vol. 22, n° 10-11, p. 941-954, October-November, 2003.

Baeten J., Verdonck W., Bruyninckx H., De Schutter J., « Combining force control and visual servoing for planar contour following », *J. of Mach. Intell. Robot. Control*, vol. 2, n° 2, p. 69-75, July, 2000.

Bruzzone L. E., Molfino R. M., Zoppi M., « Modelling and control of peg-in-hole assembly performed by translational robot », *Proc. of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control*, Innsbruck, Austria, p. 512-517, February 18-21, 2002.

Caccavale F., Siciliano B., Villani L., « The Tricept robot : dynamics and impedance control », *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 8, n° 2, p. 263-268, June, 2003.

Callegari M., Suardi A., « On the force-controlled assembly operations of a new parallel kinematics manipulator », *Proc. of the Mediterranean Conference on Control and Automation*, Rhodes, 2003.

Chaumette F., Hutchinson S., « Visual servo control, part I : basic approaches », *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. , p. 82-90, December, 2006.

Chiaverini S., Sciavicco L., « The parallel approach to force/position control of robotic manipulators », *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, n° 4, p. 361-373, 1993.

Corbel D., Company O., Pierrot F., « Optimal sesign of a 6-DOF parallel measurement mechanism integrated in a 3-DOF Pparallel machine-tool », *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Nice, France, September 22-26, 2008.

Dahmouche R., Ait-Aider O., Andreff N., Mezouar Y., « High-speed pose and velocity measurement from vision », *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'08)*, Pasadena, California, May 19-23,, 2008.

Dasgupta B., Mruthyunjaya T. S., « Closed form dynamic equations of the general Stewart platform through the Newton-Euler approach », *Mech. Mach. Theory*, vol. 33, n° 7, p. 993-1012, 1998.

Dementhon D., Davis L., « Model-based object pose in 25 lines of code », *International Journal of Computer Vision*, vol. 15, n° 1/2, p. 123-141, 1995.

DeSchutter J., Bruynincks H., Spong M., « Force control : a bird's eye view », *IEEE CSS/RAS Int. Workshop on Control Problems in Robotics and Automation : Future Directions*, San Diego, December, 1997.

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

Espiau B., Chaumette F., Rives P., « A new approach to visual servoing in robotics », *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 8, n° 3, p. 313-326, 1992.

Fasse E., Gosselin C., « On the spatial impedance control of Gough-Stewart platforms », *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Leuven, Belgium, p. 1749-1754, May, 1998.

Fraisse P., Dauchez P., Pierrot F., « Robust force control strategy based on the virtual environment concept », *Advanced Robotics*, vol. 21, n° 3-4, p. 485-498, 2007.

Hogan N., « Impedance control approach manipulation Part I, II, III », *J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 107, n° 1, p. 1-24, March, 1985.

Huang C., Liu L., Wang X., Shi S., « Robust scheme of global parallel force/position regulators for robot manipulators under environment uncertainty », *J. of Control Theory and Applications*, vol. 5, n° 3, p. 271-277, 2007.

Khalil W., Guegan S., « A novel solution for the dynamic modeling of Gough-Stewart manipulators », *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Washington, p. 816-822, 2002.

Khalil W., Ibrahim O., « General solution for the dynamic modelling of parallel robots », *J. of Intelligent Robots and Systems*, vol. 49, p. 19-37, 2007.

Khatib O., « A unified approach for motion and force control of robot manipulators : The operational space formulation », *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, n° 1, p. 43-53, Feb, 1987.

Khatib O., « The operational space framework », *JSME International Journal*, vol. 36, n° 3, p. 277-287, 1993.

Majou F., Wenger P., Chablat D., « Design of a 3 axis parallel machine tool for high speed machining : the Orthoglide », *IDMME*, Clermont-Ferrand, France, May 14-16, 2002.

Marchand E., Chaumette F., « Virtual visual servoing : a framework for real-time augmented reality », *Computer Graphics Forum*, vol. 21, n° 3, p. 289-298, September, 2002.

Masson M., « Compliance and force control for computer controlled manipulators », *IEEE Transaction on systems, Man, and Cybernetics*, vol. 11, n° 6, p. 418-432, June, 1981.

Merlet J., « Force feedback control of parallel manipulators », *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, vol. 3, Philadelphia, Pennsyvania, p. 1484-1489, April, 1988.

Merlet J., *Parallel Robots*, Kluwer academic publishers, 1999.

Morel G., Malis E., Boudet S., « Impedance based combination of visual and force control », *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Leuven, Belgium, p. 1743-1748, May, 1998.

Muller A., Maier P., « Kinematic and dynamic properties of parallel manipulators », *Multibody System Dynamics*, vol. 5, n° 3, p. 223-249, 2001.

Nelson B., Morrow J., Khosla P., « Fast stable transitions with a stiff manipulator using force and vision feedback », *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, Pittsburgh, p. 90-95, August, 1995.

Paccot F., Ait-Aider O., Andreff N., Martinet P., « Some issues on dynamic control of parallel kinematic machines », *13th International Conference on Advanced Robotics (ICAR'07)*, 2007.

Paccot F., Lemoine P., Andreff N., Chablat D., Martinet P., « A Vision-based computed torque control for parallel kinematic machines », *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, vol. 24, Pasadena, CA, USA, p. 1556-1561, May 19-23, 2008.

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011

Pashkevich A., Chablat D., Wenger P., « Kinematics and workspace analysis of a three-axis parallel manipulator : the Orthoglide », *Robotica*, 2006.

Perdereau V., Drouin M., « A new scheme for hybrid force-position control », *Robotica*, vol. 11, p. 453-464, 1993.

Pomares J., Garcia G., Torres F., « A robust approach to control robot manipulators by fusing visual and force information », *J. of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 48, p. 437-456, 2007.

Raibert M., « Manipulator control using the configuration space method », *Industrial Robot, an International Quarterly Journal*, vol. 5, n° 2, p. 69-74, June, 1978.

Raibert M., Craig J., « Hybrid position force control of manipulators », *J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 103, n° 2, p. 126-133, June, 1981.

Saadia N., Amirat Y., Pontnau J., Cherif R., « Force feedback control of an assembly robot by neural networks », *Int. Conf. on Artificial Neural Networks (ICANN)*, vol. 1327, Lausanne, October, 8-10, 1997.

Satya S. M., Ferreira P. M., Spong M. W., « Hybrid control of a planar 3-DOF parallel manipulator for machining operations », *Trans. of the NAMRI/SME*, vol. 23, p. 273-280, 1995.

Shirai S., Inoue H., « Guiding a robot by visual feedback in assembling tasks », *Pattern Recognition*, vol. 5, p. 99-108, 1973.

Tarokh M., « Real time forward kinematics solutions for general Stewart platforms », *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Roma, Italy, April, 10-14, 2007.

Tavolieri C., Ottaviano E., Ceccarelli M., « Pose determination for a rigid body by means of CaTraSys II (Cassino Tracking System) », *Proceedings of EuCoMeS, the first European Conference on Mechanism Science*, Obergurgl (Austria), February 21-26, 2006.

Reçu le : 17 mars 2009
Accepté après révisions le : 10 mai 2010

hal-00586870, version 1 - 18 Apr 2011