

Des droites et des robots.

Modélisation, identification et commande référencées vision
des machines complexes.

Nicolas Andreff

29 juin 2006

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Contexte local	5
1.1.1	Enseignement	5
1.1.2	Recherche	6
1.2	Justification des travaux	7
1.3	Contributions	9
1.4	Organisation du document	10
2	MICMAC modulaire	15
2.1	Introduction	15
2.2	Méthodologie	15
2.3	Modélisation	16
2.3.1	Vision	17
2.3.2	Cinématique	21
2.4	Commande	27
2.4.1	Propriétés dans le cas sériel	28
2.4.2	Commande articulaire dans le cas parallèle	35
2.4.3	Commande cartésienne dans le cas parallèle	37
2.4.4	Commande référencée capteurs dans le cas parallèle	37
2.4.5	Asservissement visuel dans le cas parallèle	38
2.5	Identification	45
2.5.1	Besoins d'identification pour les différentes commandes	47
2.5.2	Identification des robots parallèles	48
2.5.3	Quelques aspects numériques	51
2.6	Conclusion et perspectives intermédiaires	57
3	MICMAC intégré	63
3.1	Introduction	63
3.2	Méthodologie	63
3.3	Modélisation	64
3.3.1	Représentation des droites	65

3.3.2	Cinématique	66
3.4	Commande	85
3.5	Identification	98
3.5.1	Méthode numérique	98
3.5.2	Utilisation des invariants des liaisons	99
3.5.3	Approche intégrée	100
3.6	Conclusion et perspectives intermédiaires	101
4	MICMAC dynamique classique	107
4.1	Introduction	107
4.2	Méthodologie	108
4.3	Modélisation	108
4.3.1	Dynamique	108
4.3.2	Vision rapide	111
4.4	Commande dynamique	119
4.4.1	Commande dynamique en robotique sérielle	120
4.4.2	Commande dynamique en robotique parallèle	123
4.5	Identification	128
4.6	Conclusion et perspectives intermédiaires	130
5	Conclusions et perspectives	133
5.1	Conclusions	133
5.2	Perspectives	135
A	Notice individuelle	147
A.1	Curriculum vitae	147
A.2	Participation aux projets scientifiques	149
A.3	Animation de la communauté scientifique	150
A.4	Activités d'encadrement et co-encadrement	152
A.5	Publications de l'auteur	153
A.6	Liste des 5 articles les plus significatifs	159

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte local

Il faut replacer ce document dans son contexte local. C'est une histoire que nous faisons démarrer le 1er septembre 2000, allez savoir pourquoi. A cette date, l'Institut Français de Mécanique Avancée recrute un Professeur des Universités et un Maître de Conférences, avec pour missions de monter une orientation « conception mécatronique » au sein de son pôle MMS (Mécanismes, Machines, Structures) et d'établir une collaboration entre le Laboratoire de Recherches et Applications en Mécanique Avancée (LaRAMA), devenu depuis le Laboratoire Mécanique et Ingénieries (LaMI), et le Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Electronique et d'Automatique (LASMEA). Cette collaboration, menée initialement par deux Professeurs des Universités, un Maître de Conférences et un Doctorant, va devenir une action motrice de la constitution de la Fédération de Recherche Technologies de l'Information, de la Mobilité et de la Sûreté (TIMS), en particulier dans le projet Machines et Mécanismes Innovants (M2I). Elle a ainsi permis un rapprochement fort de l'équipe ERA MMS du LaMI et du groupe GRAVIR du LASMEA.

1.1.1 Enseignement

L'orientation « conception mécatronique » se déroule, un peu par la force des choses et par le profil des deux enseignants recrutés, en deux temps. Tout d'abord, les élèves-ingénieurs suivent un fort tronc commun en conception mécanique, puis ils reçoivent une spécialisation en automatique-robotique avancée. En effet, au travers de trois unités de valeurs, ils s'initient à l'informatique temps-réel et aux réseaux de terrain (U.V. Intégration des Systèmes Complexes), à la commande optimale et non-linéaire avec illustration par l'asservissement visuel (U.V. Commande des Machines

et des Robots) et, enfin, aux techniques d'identification en robotique : étalonnage de caméras, identification géométrique et dynamique (U.V. Etalonnage et Identification des Systèmes).

1.1.2 Recherche

La collaboration entre le LaRAMA et le LASMEA devait initialement porter sur l'étude de l'utilité de la vision artificielle pour l'identification dynamique de machines parallèles. Cependant, la richesse et la complexité de ce thème font que nous ne commençons à vraiment aborder le sujet que six ans plus tard. Pourtant, nous n'avons pas chômé en chemin !

En effet, comme nous le verrons dans ce document, l'utilisation de la vision en robotique parallèle s'est immédiatement révélée fructueuse pour l'identification géométrique. Ce n'est pas vraiment surprenant puisque la vision est essentiellement un capteur de la géométrie de l'espace cartésien qui nous entoure. Le temps de récolter quelques fruits, et hop ! trois ans s'étaient écoulés.

L'occurrence d'une difficulté technologique — où trouver une caméra suffisamment rapide pour répondre aux besoins de l'identification dynamique ? — et la réussite d'une tentative d'exploitation, pour la commande, des concepts créés pour l'identification géométriques ont élargi notre champ d'action vers cette dernière. Cela nous a amenés à reprendre nos gammes robotiques, en l'occurrence à nous pencher de plus près sur la modélisation géométrique et cinématique des mécanismes parallèles.

Enfin, nous avons démarré notre étude de l'apport de la vision dans la dynamique des robots parallèles. Avec le recul pris depuis le lancement de la collaboration initiale, cette étude porte non seulement sur l'identification mais également (surtout ?) sur la modélisation et la commande dynamique des robots parallèles par vision.

Entre-temps, ces travaux de recherche ont pris une ampleur nationale puisqu'ils se sont intégrés dans le projet CNRS ROBEA MAX « Machines à Architectures complexes », prolongé par le projet CNRS ROBEA MP2 « Machines Parallèles et Précision », qui ont fédéré l'activité scientifique française autour des machines parallèles. Ces travaux s'intègrent désormais dans le projet européen IP NEXT « Next generation production systems ».

Pour reprendre le titre de ce qui doit être le livre de chevet de tout roboticien français et le titre du projet MAX, nous avons donc développé une recherche innovante sur le thème « Modélisation, Identification et Commande référencées vision de Machines Complexes » (*MICMAC*). Depuis qu'elle existe, cette activité a essentiellement occupé les étudiants suivants :

Pierre Renaud (Doctorant, 2000–2003) a travaillé sur l'apport de la vision pour l'identification géométrique des mécanismes parallèles. Ses travaux sont à l'origine d'une approche nouvelle de la robotique parallèle où la caméra observe les jambes plutôt que l'organe terminal du robot.

Arnaud Marchadier (DEA, 2004) a été à l'origine des premiers résultats de commande de la plateforme de Gough-Stewart par observation des jambes.

Tej Dallej (Doctorant, 2004–2007) étudie la commande cinématique des robots parallèles par vision. Il a implanté un asservissement visuel classique de leur organe terminal et travaille à l'extension de l'asservissement visuel de leur jambes et aux méthodes d'étalonnage associées.

Hicham Hadj-Abdelkader (Doctorant, 2003–2006) a essentiellement travaillé sous la direction de Youcef Mezouar sur l'utilisation de la vision omnidirectionnelle pour l'asservissement visuel de robots. Ses travaux rejoignent, sur la fin de sa thèse, la robotique parallèle et l'observation des jambes.

Omar Ait-Aider (Post-doctorant, 2004–2006) a développé des algorithmes innovants permettant la mesure par vision rapide de la pose et de la vitesse d'un robot parallèle. Il travaille à l'exploitation de ces résultats pour l'identification dynamique.

Flavien Paccot (Master en 2004 puis Doctorant, 2005–2008) étudie la modélisation dynamique des robots parallèles et leur commande dynamique par vision rapide.

Une bonne partie des termes techniques utilisés ci-dessus sont obscurs au lecteur non averti, mais ces précisions étaient nécessaires pour rendre à qui de droit ce qui lui est dû dans ce document. Il est maintenant temps pour une justification de ces travaux scientifiques.

1.2 Justification des travaux

Un mécanisme à structure cinématique parallèle (ou plus simplement mécanisme parallèle) a pour caractéristique de posséder une plateforme mobile (dite aussi organe terminal) reliée à sa base fixe par plusieurs chaînes cinématiques. Chaque chaîne cinématique est elle-même une succession de corps et d'articulations. Il s'oppose ainsi à un mécanisme à structure cinématique sérielle (ou plus brièvement mécanisme sériel) dont l'organe terminal se situe à l'extrémité d'une unique chaîne cinématique.

De manière un peu simpliste, la chaîne cinématique d'un robot sériel est en général assez longue et chacune de ses articulations est actionnée par un moteur et instrumentée par un capteur. A l'inverse, les chaînes cinématiques (ou jambes) d'un robot parallèle sont relativement courtes et possèdent plusieurs articulations non actionnées (passives) et non instrumentées et une seule articulation actionnée et instrumentée.

La commande d'un robot sériel n'est pas simple, mais après plusieurs décennies de recherches, elle commence à être à peu près bien maîtrisée. Cependant, les robots sériels ne suffisent pas toujours à satisfaire les besoins industriels. Les principaux

défauts qui leur sont reprochés sont un manque de rigidité, un rapport trop faible entre la masse supportée et les efforts développés dans les moteurs, des vitesses de déplacement limitées, un manque de répétabilité, etc.

C'est pourquoi une grande activité de recherche est née autour des robots parallèles. En effet, ceux-ci permettent de déplacer, à consommation énergétique égale, des charges plus élevées à des vitesses plus grandes et avec une plus grande répétabilité, qu'un robot sériel. La raison fondamentale à cela est la présence de plusieurs jambes, qui augmentent la rigidité, permettent de placer les moteurs sur la base et donc de déplacer un poids propre réduit. Ainsi, leur meilleure répétabilité est due au fait que les incertitudes, au lieu de s'accumuler le long d'une unique chaîne cinématique, se répartissent sur l'ensemble des jambes

En revanche, leur volume de travail est réduit par rapport à un robot sériel et, en ce qui nous concerne dans ce document, ils souffrent de deux défauts intrinsèques.

Tout d'abord, malgré leur meilleure répétabilité (précision relative), ils n'ont pas une meilleure justesse (précision absolue) que les robots sériels. La raison à cela est que leur assemblage est plus complexe : toutes les jambes doivent se rejoindre depuis la base jusque sur l'organe terminal (contrainte de fermeture des chaînes cinématiques). Ceci n'est souvent possible qu'au prix de petites libertés prises par rapport au modèle CAO, nécessitées par l'accumulation des erreurs et tolérances de fabrication. Ainsi, le modèle CAO du robot ne correspond pas exactement à la réalité et son utilisation pour la commande génère des biais non forcément constants, donc non forcément compensables par réglage et recalage. Il faut donc procéder à une identification du modèle géométrique pour recalibrer un modèle numérique réaliste sur le robot réel.

Ensuite, la commande d'un robot parallèle est particulièrement complexe. Nous verrons exactement pourquoi plus loin, mais intuitivement, on comprendra que cela est essentiellement dû au fait que la commande doit tenir compte des contraintes de fermeture des chaînes cinématiques. En effet, du fait de ces fermetures, un mouvement sur un moteur d'une jambe entraîne des mouvements dans les articulations passives des autres jambes. Il existe donc un fort couplage entre les mouvements articulaires qui rendent impossible la réalisation d'un mouvement simple à l'aide d'un seul moteur : tout mouvement nécessite l'actionnement synchronisé de tous les moteurs. Il faut donc mettre en œuvre des techniques de commande spécifiques à ce type de mécanisme. Remarquons néanmoins qu'une approche alternative consiste à concevoir des mécanismes parallèles découplés, tels que la famille clermontoise des ISOGLIDEn-TxRy.

Ce couplage fort des mouvements articulaires fait qu'il est difficile de découper la commande d'un robot parallèle se déplaçant à grande vitesse en deux parties, comme cela est souvent fait pour un robot sériel : une première boucle de commande rapide compense les effets dynamiques dus aux masses en mouvement rapide et une seconde boucle, éventuellement plus lente, compense les erreurs géométriques

de positionnement ou de suivi de trajectoire. De plus, afin d'assurer de bonnes performances dynamiques au robot, il faut disposer d'un modèle précis de ce dernier. Il faut donc, ici encore, procéder à une identification, cette fois-ci dynamique, et à l'écriture de lois de commande dynamique dédiées.

L'asservissement visuel est un domaine de recherche dans lequel la vision est utilisée pour commander un robot. Les bonnes qualités métrologiques intrinsèques d'un capteur de vision (tant en termes de répétabilité que de justesse) ont permis depuis plusieurs décennies d'améliorer la précision des robots sériels et mobiles. Aussi est-il tout à fait naturel de vouloir le transposer au cas des robots parallèles, ce qui n'a été que très rarement et trop ponctuellement tenté dans le passé. Par ailleurs, des résultats récents tendent à montrer que l'asservissement visuel, méthode de commande essentiellement cinématique, peut être utilisé à haute vitesse pour des robots sériels. Et si nous essayions de voir ce que cela donne pour un robot parallèle ?

Enfin, la vision artificielle a conquis ses lettres de noblesse pour l'identification géométrique de robots sériels, par le biais de sa capacité à mesurer la pose d'un objet à partir d'une image. Aussi souhaitons-nous voir en quelle mesure ces méthodes pouvaient être exploitées (dans le cas géométrique) ou étendues (dans le cas dynamique) en robotique parallèle.

1.3 Contributions

Les résultats nouveaux rapportés dans ce document sont multiples. Tout d'abord, dans une approche classique, où des marqueurs visuels sont placés sur l'organe terminal du robot, nous avons mis en œuvre la première validation expérimentale de l'identification géométrique de robots parallèles par vision. Nous avons également proposé un critère de choix des configurations de mesure optimales pour cette méthode. En suivant cette approche classique, nous avons montré que l'asservissement visuel 3D pose d'un robot parallèle est une simple commande par retour d'état non-linéaire. Ce faisant, nous avons montré une propriété fondamentale (et, nous le souhaitons, fondatrice) des robots parallèles à savoir que leur état est donné par la position et l'orientation (la pose) de leur organe terminal. Pour cela, nous avons tenté de formaliser de manière homogène la cinématique des robots tant sériels que parallèles, exhibant ainsi une certaine dualité entre robots sériels et parallèles. Cette dualité a également été démontrée dans le cas dynamique, ce qui permet d'envisager la commande de robots parallèles, tant cinématique que dynamique, par vision uniquement et sans recours aux variables articulaires qui s'avèrent inutiles.

Alternativement, l'intuition que les jambes d'un mécanisme puissent contenir l'information de l'état du mécanisme nous a ouvert la voie vers une approche plus novatrice, dans laquelle la modélisation, l'identification et la commande sont entrelacées et permettent une représentation plus cohérente de la cinématique d'un mé-

canisme parallèle que dans l'approche classique. Selon cette approche, nous avons aussi bien proposé des méthodes d'identification des modèles géométriques classiques qu'esquissé des méthodes d'identification des modèles utilisés dans cette approche intégrée. Nous avons également proposé des méthodes de commande, construites sur une représentation projective de la cinématique d'un robot parallèle.

Enfin, nous avons ouvert un vaste champ de recherche en vision par ordinateur. En effet, les besoins en vision rapide générés par l'identification et la commande dynamique nous ont amenés à faire l'acquisition d'une caméra à exposition séquentielle. Cette acquisition, quelque peu hâtive reconnaissons-le, nous a placés devant un défaut majeur de ce type de caméra : les pixels de l'image ne sont pas tous acquis simultanément ! Le mouvement d'un objet rapide devant une telle caméra se traduit par des déformations optiques qui perturbent les algorithmes de calcul de pose, même les plus récents. Les finances publiques, et surtout les crédits alloués à la recherche, étant ce qu'ils sont, nous n'avons pas jeté cette caméra aux ordures. Bien nous en a pris car ce défaut majeur s'est révélé être la source d'une méthode de mesure instantanée non seulement de la pose d'un objet connu mais également de sa vitesse cartésienne instantanée, et ce en une seule image. A partir de ce résultat, toute la vision par ordinateur peut être revisitée dans une approche à la fois projective et différentielle.

Un mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches ne devant, à notre sens, pas être un simple regard en arrière sur les recherches effectuées, mais également un exercice prospectif, les résultats et concepts exposés dans ce document n'ont pas tous été pleinement et entièrement validés et un certain nombre d'entre eux peuvent être discutés.

1.4 Organisation du document

Bien qu'il soit de bon ton de faire un état de l'art formel, nous avons choisi de nous en affranchir. En effet, les travaux présentés dans ce document sont essentiellement transversaux. Approfondir l'état de l'art pour chacun des domaines traversés nous emmènerait bien loin et nuirait à la clarté du document. De plus, hormis en ce qui concerne une partie de l'identification géométrique, pour laquelle on trouvera un état de l'art poussé dans la thèse de Pierre Renaud [Ren03], nous nous sommes éloignés des sentiers battus.

Par conséquent, l'organisation de ce document est le suivant. Le chapitre 2 présente l'approche la plus fréquemment suivie en robotique, ce qui nous permettra de revoir nos classiques. Dans cette approche, modélisation, identification, commande et vision sont traitées indépendamment les unes des autres, voire même séquentiellement (Figure 1.1). Cela permet d'avoir une vision modulaire du problème et de se focaliser sur le module de son choix.

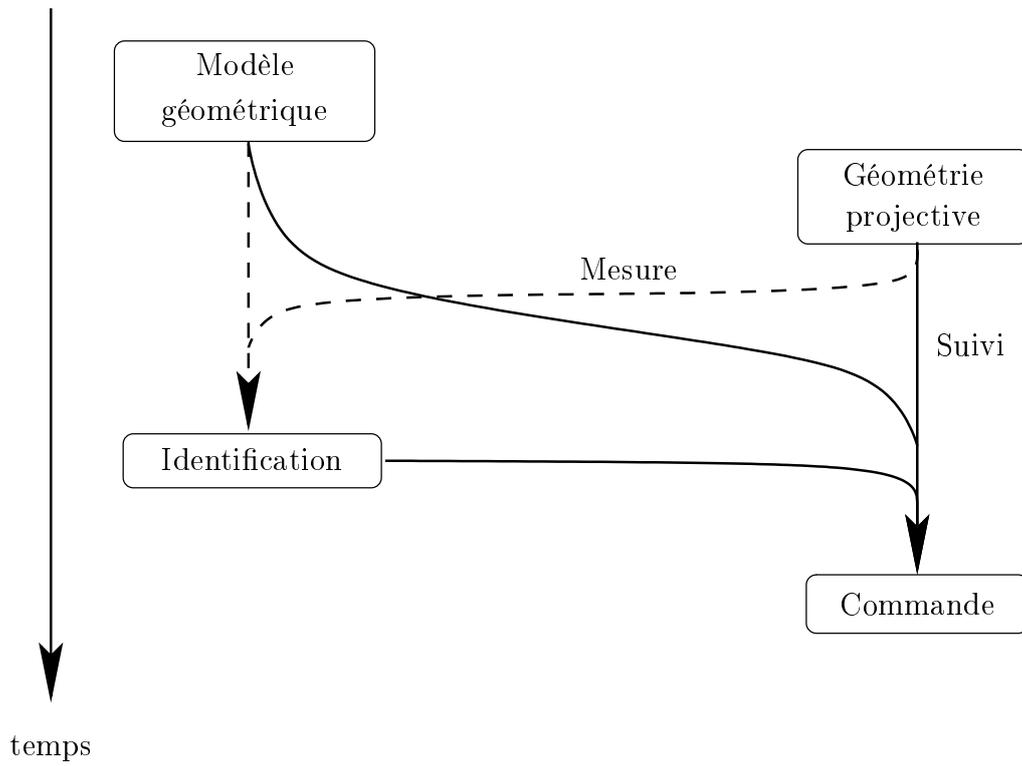


FIG. 1.1 – Approche modulaire pour la modélisation, l'identification et la commande par vision

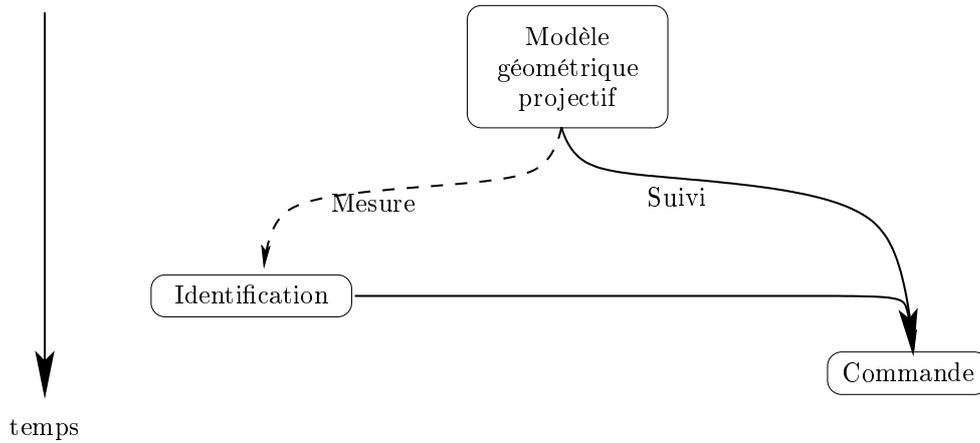


FIG. 1.2 – Approche intégrée pour la modélisation, l’identification et la commande par vision

Dans le chapitre 3, nous développerons l’approche intégrée pour la modélisation, l’identification et la commande de robots parallèles dans laquelle ces points n’interviennent plus séquentiellement (Figure 1.2), ce qui nécessite une vision d’ensemble dont a profité tout ce document.

Le chapitre 4 traite quant à lui de l’extension de l’approche classique, cinématique, au cas de la dynamique. Il présente donc l’algorithme d’estimation de pose et vitesse par vision rapide et son utilité dans la modélisation, l’identification et la commande dynamiques de robots parallèles.

Enfin, le dernier chapitre fait le point sur les enseignements à tirer de nos travaux et les perspectives qui en découlent.

Robot Blues

Texte : Nikâ

Inspiration : Buddy Guy

Musique, chant, guitare, etc., etc. : Mich'L

Un bras, un bras, j'suis qu'un bras
Ca a l'air simple, tout simple
De manipuler
Mais sans caméra, j'converg'rai pas

Mobile, mobile, j'suis mobile
Ca a l'air bien, très bien
D'être holonome
Mais une caméra, ça m'donne pas ça

Des pattes, des pattes, j'ai des pattes
Ca a l'air mieux, bien mieux
De déambuler
Mais sans caméra, j'vois pas où j'vas

Des jambes, des jambes, j'ai plein d'jambes
Ca l'air dur, très dur
D'être parallèle
Mais une caméra, ça m'dérange pas

Robots, robots, les robots
Ca a l'air de rien, oh ! rien
De les commander
Mais sans caméra, ça m'amuse pas

Chapitre 2

MICMAC modulaire

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une méthodologie de modélisation, identification et commande des robots parallèles par vision qui est, au final, essentiellement l'application de techniques éprouvées. Ces techniques ont toutes un ancrage fort dans l'expérience accumulée en robotique sérielle et ont été à des degrés divers adaptées à la robotique parallèle. Aussi, de grands pans de ce chapitre serviront d'état de l'art informel et volontairement non exhaustif. En effet, ce travail est transversal par rapport à plusieurs disciplines. Alors, plutôt que de creuser tous les aspects de chacune d'entre elles, nous préférons essayer d'apporter sur un certain nombre de points un éclairage rénové par nos réalisations transversales. Nous essaierons également de retranscrire le savoir-faire accumulé, qui est probablement plus important, dans cette partie, que le savoir scientifique nouveau.

2.2 Méthodologie

Nous allons suivre dans ce chapitre la méthodologie traditionnelle, qui aboutit à la commande cinématique d'un mécanisme. Cette méthodologie est très modulaire, en ce sens, que chacune de ses étapes peut être réalisée de différentes manières, voire contournée. Les étapes qui la composent sont les suivantes :

1. Modélisation géométrique et cinématique du mécanisme ;

Le modèle du mécanisme est réalisé de manière indépendante des étapes suivantes. Il est l'image de la structure cinématique et de la réalisation mécanique du mécanisme, issues de la phase préalable de conception. Il prend pour hypothèse que le robot doit pouvoir être commandé sans attendre les choix faits

dans les étapes suivantes. Par conséquent, il considère que les articulations motorisées sont équipées de capteurs articulaires et que la commande sera par défaut de type articulaire.

2. Identification des paramètres géométriques ;

A partir du modèle obtenu précédemment se pose alors la question de l'adéquation entre le modèle et le mécanisme réel. Il faut donc choisir un modèle à la fois suffisamment complexe pour avoir une chance de capturer la réalité et suffisamment simple pour pouvoir être exploitable. Il faut ensuite estimer les paramètres intervenant dans le modèle choisi au travers d'une démarche à la fois algorithmique, numérique et expérimentale. On cherche dans cette étape à réaliser le plus précisément possible l'ajustement du modèle sur le mécanisme réel, ce qui permet, par exemple, une analyse cinématique fine du mécanisme.

3. Commande articulaire ou référencée modèle ;

Afin de commander le robot, les techniques éprouvées, provenant de la longue expérience accumulée en robotique sérielle, se répartissent en deux classes. La première est une commande purement articulaire, dans laquelle les différents moteurs sont commandés indépendamment les uns des autres. La seconde est une commande référencée modèle, dans laquelle l'action des moteurs est synchronisée en tenant compte de la cinématique spécifique du mécanisme. Elle utilise donc les modèles géométrique et cinématique établis précédemment et leurs paramètres identifiés. On fait ici, classiquement, l'hypothèse que les mouvements du robot sont suffisamment lents pour n'impliquer aucun effet dynamique ou bien celle, qui se révélera abusive dans le cas d'un robot parallèle, que la dynamique est compensée par une boucle interne.

4. Commande référencée capteurs extéroceptifs.

Cette étape n'est pas systématiquement mise en œuvre en robotique sérielle, car la commande référencée modèle suffit généralement à la satisfaction de l'utilisateur. De plus, elle nécessite une maîtrise technologique du ou des capteurs utilisés, ainsi qu'une modélisation supplémentaire, celle de l'interaction entre le ou les capteurs et l'environnement. Cette modélisation est particulièrement nécessaire lorsque le capteur utilisé est la vision. Il existe ainsi une très grande variété de schémas d'asservissement visuel.

Nous montrerons que cette dernière étape est indispensable en robotique parallèle.

2.3 Modélisation

Cette partie modélisation ne se veut pas exhaustive et suppose, de la part du lecteur, une connaissance minimale des concepts utilisés en robotique et en vision par

ordinateur. Ainsi, seuls les concepts nécessaires au développement de notre propos seront exposés.

2.3.1 Vision

Nous rappelons ici les principes de base de la vision par ordinateur. Nous nous restreindrons à la géométrie projective des points, qui sont la primitive visuelle la plus utilisée et qui suffisent pour l'approche modulaire traitée dans ce chapitre.

Formation de l'image

Commençons par rappeler le modèle de projection perspective d'un point P de l'espace 3D, ayant pour coordonnées homogènes ${}^oP = {}^t({}^oX, {}^oY, {}^oZ, 1)$ dans un repère \mathcal{R}_o associé à l'objet auquel appartient ce point. Le repère objet \mathcal{R}_o est séparé du repère \mathcal{R}_c associé à la caméra par une transformation euclidienne cT_o composée d'une rotation (représentée ici par la matrice cR_o) et d'une translation ct_o , qui constituent la *pose* (ou localisation) de l'objet par rapport à la caméra.

Alors, la projection perspective \mathfrak{p} du point P sur le plan d'équation ${}^cZ = 1$ a pour coordonnées homogènes ${}^c\mathfrak{p} = {}^t({}^cx, {}^cy, 1)$, définies par [Fau93] :

$${}^c\mathfrak{p} \propto (I_3 \quad \mathbf{0}_{3 \times 1}) {}^cT_o {}^oP \quad (2.1)$$

où le signe \propto signifie « proportionnel à ».

La numérisation de l'image, c'est-à-dire la conversion des coordonnées normalisées ${}^c\mathfrak{p}$ du point \mathfrak{p} en coordonnées pixelliques ${}^{im}\mathfrak{p} = {}^t(u, v, 1)$, se fait par un changement de repère dans le plan de forme générale :

$${}^{im}\mathfrak{p} = \mathbf{K} {}^c\mathfrak{p} \quad \text{avec} \quad \mathbf{K} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Avec la convention présentée en Figure 2.1 et l'hypothèse, désormais réaliste pour la plupart des caméras du marché, que les pixels sont rectangulaires et parfaitement alignés, la matrice \mathbf{K} des *paramètres intrinsèques* prend la forme :

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \alpha_u > 0 \\ \alpha_v > 0 \end{matrix} \quad (2.3)$$

dont les interprétations physiques peuvent être trouvées dans n'importe quel bon manuel de vision par ordinateur [Fau93]. Notons néanmoins que la convention choisie nécessite un peu d'attention au moment de la programmation car le codage des images sous forme matricielle suit la convention inverse quant à l'ordre des coordonnées : $(i, j) \leftrightarrow (v, u)$.

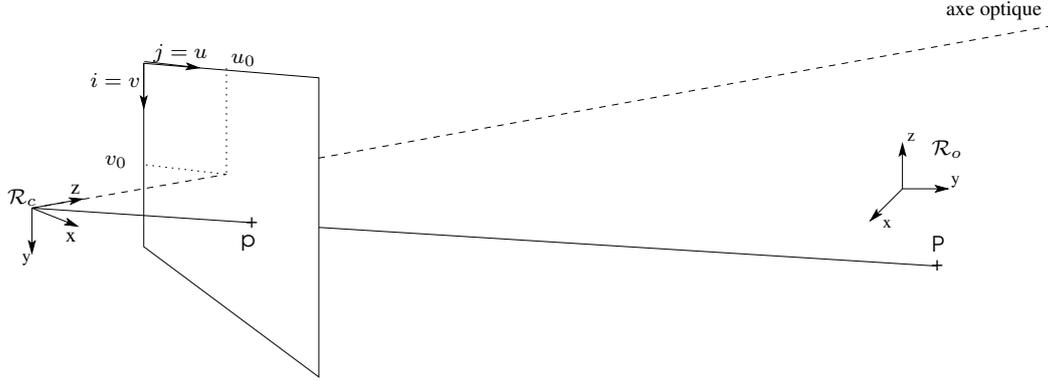


FIG. 2.1 – Une convention pratique pour le choix des axes

Au final, le modèle perspectif complet s'écrit :

$${}^{im}\mathbf{p} \propto (\mathbf{K} \ \mathbf{0}_{3 \times 1}) {}^cT_o {}^o\mathbf{P} \quad (2.4)$$

A ce modèle doit être apporté un complément lorsque l'effet de la lentille n'est pas purement perspectif (cas des lentilles à focale courte). En effet, dans ce cas, des déformations optiques apparaissent : une droite de l'espace ne se projette plus en une droite mais en une courbe. Le *modèle de déformation optique* le plus courant, basée sur des considérations expérimentales [Ame84], consiste à introduire deux corrections (l'une radiale $\delta\mathbf{r}$ et l'autre tangentielle $\delta\mathbf{t}$), approximations polynômiales de la déformation de l'image perspective. Notons que ces corrections peuvent être apportées sous deux formes :

- redressement de l'image réelle ;

On redresse ainsi l'image fournie par la caméra (point ${}^d\mathbf{p}$) pour se ramener à une image compatible avec la projection perspective (point ${}^c\mathbf{p}$) :

$${}^c\mathbf{p} = (1 + \alpha_1 {}^d r^2 + \alpha_2 {}^d r^4 + \alpha_3 {}^d r^6) {}^d\mathbf{p} + \begin{pmatrix} 2\alpha_4 {}^d x {}^d y + \alpha_5 ({}^d r^2 + 2{}^d x^2) \\ \alpha_4 ({}^d r^2 + 2{}^d y^2) + 2\alpha_5 {}^d x {}^d y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

où ${}^d r^2 = {}^d x^2 + {}^d y^2$ et $\xi_{opt} = {}^t(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5)$ est le vecteur des paramètres de correction optique.

- déformation du modèle de projection perspective.

On plaque ainsi le modèle sur les mesures :

$${}^d\mathbf{p} = (1 + \alpha'_1 {}^c r^2 + \alpha'_2 {}^c r^4 + \alpha'_3 {}^c r^6) {}^c\mathbf{p} + \begin{pmatrix} 2\alpha'_4 {}^c x {}^c y + \alpha'_5 ({}^c r^2 + 2{}^c x^2) \\ \alpha'_4 ({}^c r^2 + 2{}^c y^2) + 2\alpha'_5 {}^c x {}^c y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

où ${}^c r^2 = {}^c x^2 + {}^c y^2$ et $\xi'_{opt} = {}^t(\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3, \alpha'_4, \alpha'_5)$ est le vecteur des paramètres de déformation optique.

Dans le premier cas, une fois la correction apportée, les traitements sont relativement simples (car basés sur de l'algèbre linéaire) mais la valeur des paramètres de déformation doit être déterminée avec la plus haute précision afin de ne pas déformer le signal.

Dans le second cas, les traitements sont plus complexes, puisque le modèle de projection n'est plus linéaire. Comme les traitements sont faits au plus près du signal, la précision finale est fortement susceptible d'être plus élevée que dans le premier cas, mais le temps de traitement sera plus long.

Comme l'inversion de ces modèles n'est pas simple, il faut choisir dès l'étape de modélisation, laquelle des deux corrections est la plus adaptée à l'application visée : on préférera, par exemple, le premier cas pour des applications de commande et le second pour des applications d'identification géométrique.

Exploitation des images

Le modèle de projection perspective d'un point, complété éventuellement par un modèle de déformation optique, peut être exploité de plusieurs manières :

Calcul de pose Sous l'hypothèse que les paramètres intrinsèques, les paramètres de déformation, l'observation d'un point de l'image mis en correspondance avec un point 3D de coordonnées connues dans un repère objet ne laisse dans l'équation (2.4) que la pose inconnue. En observant un nombre suffisant de points (au minimum 4 points non coplanaires ou 3 points coplanaires), on peut alors inverser numériquement la relation de projection perspective et estimer la pose inconnue.

Il existe de nombreuses méthodes pour cela [DD95a, PHT95, TMHF00] qui se ramènent à résoudre le problème suivant :

$$\min_{{}^cT_o} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_{pts}} \| {}^{im}\mathbf{p}_k - (\mathbf{K} \ \mathbf{0}_{3 \times 1}) {}^cT_o {}^oP_k \|^2 \quad (2.7)$$

dans lequel ${}^{im}\mathbf{p}_k$ peut être exprimé avant ou après correction des déformations optiques selon les méthodes, et où des représentations alternatives de la pose peuvent être utilisées (translation+angles, translation+quaternions, quaternions duaux, etc.).

La plupart des méthodes fonctionnent en deux temps. D'abord, une estimée initiale de la pose est obtenue par des techniques linéaires, puis cette estimée est affinée par un algorithme de descente (gradient, Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt) qui consiste en une résolution itérative par approximations linéaires successives.

Reconstruction tridimensionnelle En relâchant l'hypothèse de la connaissance de la géométrie de l'objet, l'équation (2.4) laisse deux types d'inconnues : la

pose et les coordonnées 3D du point. Par l'observation d'un nombre suffisant de points (au minimum 5 points non coplanaires) mis en correspondance dans plusieurs images (au moins 2 poses différentes), on peut estimer simultanément le déplacement relatif de la caméra et la géométrie de l'objet dans le repère de la première caméra, à un facteur d'échelle inconnu (noté ici λ) :

$$\min_{c_j \mathbf{T}_{c_{j+1}/\lambda, j} \mathbf{P}_k / \lambda} \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_{images}} \sum_{k=1}^{N_{pts}} \| {}^{im} \mathbf{p}_k^j - (\mathbf{K} \ \mathbf{0}_{3 \times 1})^{c_j} \mathbf{T}_{c_1}^{c_j} \mathbf{P}_k \|^2 \quad (2.8)$$

Notons qu'en relâchant certaines contraintes sur la connaissance des paramètres intrinsèques et des paramètres de déformation optique, on peut obtenir des reconstructions tridimensionnelles non euclidiennes : affines ou projectives.

Étalonnage classique Sous la seule hypothèse d'une géométrie connue de l'objet (mire), on peut également faire l'identification du modèle de projection (éta-lonnage de la caméra) à partir de l'observation de la mire sous plusieurs poses :

$$\min_{\mathbf{K}, c_j \mathbf{T}_o, \xi_{opt}} \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_{images}} \sum_{k=1}^{N_{pts}} \| {}^{im} \mathbf{p}_k^j - (\mathbf{K} \ \mathbf{0}_{3 \times 1})^{c_j} \mathbf{T}_o^o \mathbf{P}_k \|^2 \quad (2.9)$$

Étalonnage caméra+mire La méthode classique d'éta-lonnage de caméra repose sur une connaissance parfaite de la géométrie de la mire. Cela signifie en pratique une réalisation physique de la mire de haute précision (inférieure au micron) et à grands frais (budgétaires ou temporels). Lavest *et al.* [LVD98] ont donc proposé une méthode, basée sur les techniques d'ajustement de faisceaux et couplant reconstruction tridimensionnelle et éta-lonnage classique, qui permet de relâcher toutes les hypothèses sauf la mise en correspondance inter-image des points 2D observés :

$$\min_{\mathbf{K}, c_j \mathbf{T}_o / \lambda, \xi_{opt}, o \mathbf{P}_k / \lambda} \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_{images}} \sum_{k=1}^{N_{pts}} \| {}^{im} \mathbf{p}_k^j - (\mathbf{K} \ \mathbf{0}_{3 \times 1})^{c_j} \mathbf{T}_o^o \mathbf{P}_k \|^2 \quad (2.10)$$

Cela permet, d'un point de vue pratique, de gagner encore un peu de précision sur l'éta-lonnage puis le calcul de pose de la mire éta-lonnée par rapport à la caméra éta-lonnée simultanément, mais surtout de simplifier la réalisation de mire, puisqu'une simple réalisation manuelle est désormais envisageable. En revanche, il faut en contre-partie assurer une détection extrêmement précise des points dans l'image, d'où l'utilisation de marqueurs spécifiques, tels ceux rendus célèbres par les « crash-tests » automobiles ou encore des pastilles ou sphères rétroréfléchissantes.

2.3.2 Cinématique

Il existe de multiples méthodes [GCB97] pour modéliser la cinématique des robots sériels, la plus connue étant celle proposée par Denavit et Hartenberg [DH55], la plus auvergnate étant la méthode TCS proposée par Gogu [GCB97] et la plus efficace, à notre avis, lorsque l'on souhaite identifier et commander un robot, étant celle proposée par Khalil et Kleinfinger [KK86]. Toutes ces méthodes sont essentiellement conçues pour modéliser des chaînes cinématiques sérielles voire arborescentes. Elles peuvent être étendues pour modéliser des chaînes cinématiques fermées.

Néanmoins, la plupart des modèles de mécanismes parallèles établis dans la littérature scientifique, sont obtenus par la prise en compte des contraintes de fermeture de boucle. Ils aboutissent à la détermination d'un *modèle géométrique*, qui établit une relation, non forcément bijective, entre les positions des moteurs et la pose de l'organe terminal. Ce modèle fait intervenir les *paramètres géométriques* décrivant la topologie et les dimensions du robot

Modèles géométriques

Rappelons qu'indépendamment du type de robot considéré, il existe différents types de modèles géométriques (ou modèles cinématiques d'ordre 0) :

Modèle géométrique direct Ce modèle est le modèle le plus intuitif, puisqu'il permet de connaître la pose de l'organe terminal X en fonction de la position des moteurs \mathbf{q} et des paramètres géométriques du robot ξ_{geom} :

$$X = G_D(\mathbf{q}, \xi_{geom}) \quad (2.11)$$

où l'expression de G_D dépend du choix de la représentation de la pose.

Modèle géométrique inverse Comme son nom l'indique, ce modèle fournit, à l'inverse du modèle géométrique direct, les valeurs articulaires en fonction de la pose de l'organe terminal et des paramètres géométriques :

$$\mathbf{q} = G_I(X, \xi_{geom}) \quad (2.12)$$

Modèle géométrique implicite Les deux types de modèles géométriques peuvent être inclus dans un modèle plus générique, appelé modèle implicite, qui se contente d'établir une relation entre la pose, la configuration articulaire et la géométrie du robot, sans en tirer explicitement une expression analytique pour l'une ou l'autre :

$$G_\phi(X, \mathbf{q}, \xi_{geom}) = 0 \quad (2.13)$$

Propriété 1 (Existence des modèles géométriques)

Selon le robot considéré, il n'est pas toujours licite d'écrire les modèles direct ou inverse, car les expressions ci-dessus supposent que G_D et G_I soient des applications.

Or l'injectivité de ces relations n'est pas toujours vérifiée : il peut, par exemple, exister pour un mécanisme donné plusieurs configurations articulaires pour une même pose et vice-versa. Ainsi, nous dirons qu'un modèle géométrique existe s'il représente effectivement une application.

En revanche, il est toujours possible d'écrire le modèle implicite, qui peut être considéré comme une simple contrainte sur l'ensemble de tous les triplets $(X, \mathbf{q}, \xi_{geom})$ possibles. L'injectivité étant donc assurée (il n'y a pas deux 0), le modèle implicite existe toujours.

Modèles cinématiques

Des modèles géométriques précédents, on peut obtenir par dérivation temporelle, les modèles cinématiques (ou modèles cinématiques d'ordre 1) associés, sous l'hypothèse d'invariance des paramètres géométriques, reliant vitesse cartésienne de l'organe terminal et vitesses articulaires :

Modèle cinématique direct Le modèle cinématique direct peut s'écrire soit sous une forme faisant apparaître la dérivée de la représentation choisie pour X :

$$\dot{X} = \frac{\partial G_D}{\partial \mathbf{q}}(\mathbf{q}, \xi_{geom}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2.14)$$

soit, plus fréquemment, sous une forme faisant apparaître le torseur cinématique $\boldsymbol{\tau}$ associé au mouvement instantané de l'organe terminal par rapport à la base. Ce torseur est composé d'une vitesse de translation \mathbf{v} et d'une vitesse de rotation $\boldsymbol{\omega}$. Pour fournir des coordonnées à ces entités géométriques, il faut préciser son point d'application et le repère dans lequel il est exprimé. Ainsi, la notation ${}^i\boldsymbol{\tau}_j$ représente les coordonnées du torseur cinématique appliqué en l'origine du repère \mathcal{R}_j , exprimées dans le repère \mathcal{R}_i . Le lecteur est renvoyé à [Ang97, Mac90] pour de meilleures descriptions de la cinématique d'un corps solide. Cette expression du modèle cinématique direct en fonction du torseur cinématique est :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{A}^{-1} \frac{\partial G_D}{\partial \mathbf{q}}(\mathbf{q}, \xi_{geom}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2.15)$$

où \mathbf{A} est la matrice reliant la dérivée temporelle de la représentation de la pose au torseur cinématique : $\dot{X} = \mathbf{A}\boldsymbol{\tau}$ [Ang97].

Le modèle cinématique direct est peu utilisé en commande cinématique et sert en général à fins d'analyse cinématique (transfert de forces).

Notons au passage que l'équation (2.15) indique qu'il est erroné de parler de Jacobienne directe du robot pour désigner la matrice de passage des vitesses articulaires au torseur cinématique. Nous parlerons donc plutôt de *matrice cinématique directe*, notée \mathbf{C}_D .

Cette matrice de passage n'est pas unique puisqu'elle dépend du point d'application du torseur cinématique, du repère dans lequel ce torseur cinématique est exprimé et *également du choix des unités*. Quand cela sera nécessaire, nous précisons le point d'application et le repère avec le même type de notation que pour le torseur cinématique.

Modèle cinématique inverse De la même manière, on peut obtenir formellement le modèle cinématique inverse par dérivation temporelle du modèle géométrique inverse :

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{\partial G_I}{\partial \mathbf{X}}(\mathbf{X}, \xi_{geom}) \dot{\mathbf{X}} \quad (2.16)$$

ou

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{\partial G_I}{\partial \mathbf{X}}(\mathbf{X}, \xi_{geom}) \mathbf{A} \boldsymbol{\tau} \quad (2.17)$$

Ce modèle est indispensable pour toute commande cartésienne. Ici encore, il n'est pas permis d'appeler Jacobienne inverse du robot la matrice de passage du torseur cinématique aux vitesses articulaires et nous préférons le terme *matrice cinématique inverse*, notée \mathbf{C}_I , qui dépend bien sûr du point d'application du torseur cinématique et du repère dans lequel les coordonnées de ce dernier sont exprimées.

Modèle cinématique implicite Similairement, on obtient le modèle cinématique implicite :

$$\frac{\partial G_\phi}{\partial \mathbf{X}}(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \dot{\mathbf{X}} + \frac{\partial G_\phi}{\partial \mathbf{q}}(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (2.18)$$

ou

$$\frac{\partial G_\phi}{\partial \mathbf{X}}(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \mathbf{A} \boldsymbol{\tau} + \frac{\partial G_\phi}{\partial \mathbf{q}}(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (2.19)$$

dans lequel on devrait rajouter, en toute rigueur, les termes liés à une variation des paramètres géométriques (robot flexible) :

$$\frac{\partial G_\phi}{\partial \mathbf{X}}(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \mathbf{A} \boldsymbol{\tau} + \frac{\partial G_\phi}{\partial \mathbf{q}}(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \dot{\mathbf{q}} + \frac{\partial G_\phi}{\partial \xi_{geom}}(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \dot{\xi}_{geom} = 0 \quad (2.20)$$

Ce modèle fait apparaître trois matrices, que nous dénommerons, dans l'ordre d'apparition dans l'expression ci-dessus, *matrice cinématique cartésienne* (notée \mathbf{C}_C), *matrice cinématique articulaire* (notée \mathbf{C}_A) et *matrice de sensibilité* (notée \mathbf{C}_S). Ce dernier terme est utilisé en référence aux travaux d'analyse de sensibilité du comportement cinématique d'un robot aux défauts géométriques [RA95, OM95, PE97]. Ces matrices, à l'instar des matrices cinématiques directe et inverse, dépendent du choix fait pour la représentation de la pose et pour l'expression du torseur cinématique.

En réécrivant les équations (2.19) et (2.20) sous forme matricielle :

$$(\mathbf{C}_C \quad \mathbf{C}_A) \begin{pmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{pmatrix} = 0 \quad (2.21)$$

$$(\mathbf{C}_C \quad \mathbf{C}_A \quad \mathbf{C}_S) \begin{pmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\xi}_{geom} \end{pmatrix} = 0 \quad (2.22)$$

nous pouvons définir respectivement une *matrice cinématique implicite* (notée \mathbf{C}_ϕ) et une *matrice cinématique implicite flexible* (notée \mathbf{C}_F).

Propriété 2 (Existence des modèles cinématiques)

Dès qu'un des trois modèles géométriques existe et peut être formulé analytiquement, le modèle cinématique correspondant existe.

Propriété 3 (Lien entre les modèles cinématiques)

En l'absence de variation des paramètres géométriques, le modèle cinématique implicite permet, hors singularité, d'obtenir les deux modèles cinématiques explicites :

$$\mathbf{C}_D = \mathbf{C}_C^{-1} \mathbf{C}_A \quad \text{et} \quad \mathbf{C}_I = \mathbf{C}_A^{-1} \mathbf{C}_C$$

Les équations (2.15) et (2.17) représentent des changements d'espaces inverses l'un de l'autre, aussi est-il possible d'obtenir numériquement l'un des modèles cinématiques explicites à partir de l'autre par inversion numérique (hors singularités).

Remarquons que pour des robots ayant un nombre de degrés de liberté différent de 6, la notation $^{-1}$ dans l'expression des modèles cinématiques explicites ci-dessus est abusive et il vaudrait mieux la remplacer par la notation $^{+}$ désignant une pseudo-inverse à gauche *ad hoc*.

Singularités

Au vu de l'équation (2.20), nous proposons de distinguer les types de singularités suivants :

singularités cartésiennes dans lesquelles la matrice cinématique cartésienne est singulière :

$$\{(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \mid \mathbf{C}_C(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \boldsymbol{\tau} = 0\} \quad (2.23)$$

Ainsi, un mouvement de l'organe terminal n'engendrera aucune variation articulaire, ni aucune déformation. Notons que lorsque le modèle géométrique inverse existe, les singularités cartésiennes sont les singularités du modèle cinématique inverse.

singularités articulaires dans lesquelles la matrice cinématique articulaire est singulière :

$$\{(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \mid \mathbf{C}_A(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \dot{\mathbf{q}} = 0\} \quad (2.24)$$

Ainsi, un mouvement articulaire n'engendrera aucun mouvement de l'organe terminal, ni aucune déformation. Notons que lorsque le modèle géométrique direct existe, les singularités articulaires sont les singularités du modèle cinématique direct.

singularités de sensibilité dans lesquelles la matrice cinématique de sensibilité est singulière :

$$\{(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \mid \mathbf{C}_S(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}) \dot{\xi}_{geom} = 0\} \quad (2.25)$$

Dans ces configurations, des déformations ou variations des paramètres géométriques du robot n'auront aucune influence sur son comportement cinématique. Nous ne pouvons nous empêcher ici de mentionner la notion de robot reconfigurable.

Sous l'hypothèse habituelle de corps rigides, les singularités cartésiennes et singularités articulaires que nous proposons se ramènent respectivement aux *singularités parallèles* et *singularités sérielles* bien connues [GA90, CW98].

Dualité robot sériel/robot parallèle

Si les modèles géométrique et cinématique implicites existent pour n'importe quel mécanisme, il n'en est pas de même pour les modèles directs et inverses (voir Propriété 1).

Ainsi, pour tout robot sériel, le modèle géométrique direct existe (dont l'expression analytique est donnée par exemple par la méthode de Khalil et Kleinfinger [KK86]). Par conséquent :

Proposition 1 (Etat d'un robot sériel)

L'état d'un robot sériel est sa configuration articulaire.

En revanche, tous les robots sériels ne possèdent pas un modèle géométrique inverse. Par exemple, pour un robot 6R classique, il existe en général 2 configurations articulaires distinctes (coude gauche / coude droit) pour une même pose de l'organe terminal. Il existe néanmoins des méthodes formelles pour résoudre le *problème géométrique inverse*, c'est-à-dire pour trouver toutes les configurations articulaires pour une pose donnée [KD99]. Il existe également des méthodes numériques pour trouver une configuration articulaire pour une pose donnée, basées sur la minimisation d'un critère du type :

$$\min_{\mathbf{q}} \frac{1}{2} \|\mathbf{X} - G_D(\mathbf{q}, \xi_{geom})\|^2 \quad (2.26)$$

pour une pose X donnée et des paramètres géométriques ξ_{geom} fixés. Pour cela, la technique la plus courante consiste en l'utilisation d'un algorithme de descente qui requiert une estimation initiale de la configuration articulaire et l'inversion numérique du modèle cinématique direct.

Si le problème géométrique inverse intervient dans une boucle de commande (par exemple, pour la commande d'un robot sériel sans codeur articulaire par asservissement visuel [MCSP02]), l'estimation initiale de la configuration articulaire est le plus souvent donnée par la configuration articulaire précédente. Néanmoins, rien ne garantit que la résolution itérative convergera vers la solution physique réelle, ni même qu'elle convergera tout simplement. En effet, le problème de minimisation posé en (2.26) est identique au problème de la commande cartésienne et la résolution numérique n'est autre que le schéma utilisé pour une commande proportionnelle. Or, une commande cartésienne peut ne pas converger pour deux raisons : passage par une singularité (articulaire, en l'occurrence) ou gain proportionnel trop élevé.

Proposition 2 (Analogie problème géométrique inverse / commande)

La résolution numérique du problème géométrique inverse par les algorithmes de descente pour un robot sériel est équivalent à la commande cartésienne virtuelle de ce robot par actionnement virtuel des moteurs.

De manière duale, pour la plupart des robots parallèles, le modèle géométrique inverse existe (même si son expression analytique peut être difficile à obtenir), mais tous ne possèdent pas un modèle géométrique direct. Par exemple, une plateforme de type Gough-Stewart peut posséder jusqu'à 40 solutions réelles au problème géométrique direct [Die98]. Dualement au cas sériel, nous pouvons donc établir que :

Proposition 3 (Etat d'un robot parallèle)

Si le modèle géométrique inverse d'un robot parallèle existe, alors son état est la pose de son organe terminal.

Pour la suite de ce chapitre, nous ne nous intéresserons qu'au cas fréquent où la prémisse de cette Proposition est avérée. Cela exclut de ce chapitre le cas de certains mécanismes bien connus, tels le 3-RRR, ou encore les mécanismes parallèles redondants.

Il existe également des méthodes formelles pour résoudre le *problème géométrique direct* [Mer90b, Hus96a] mais dont la résolution numérique est difficile (recherche des racines de polynômes d'ordre élevé, par exemple). Aussi a-t-on recours à des techniques numériques de minimisation du critère suivant :

$$\min_X \frac{1}{2} \|G_I(X, \xi_{geom}) - \mathbf{q}\|^2 \quad (2.27)$$

Cela nous amène à énoncer que :

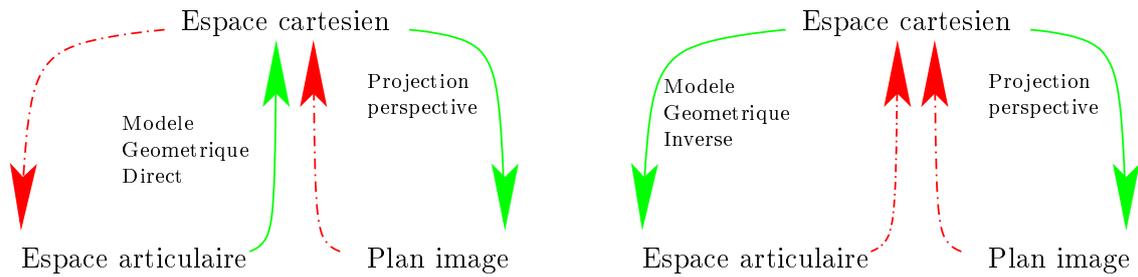


FIG. 2.2 – Dualité entre robotique sérielle (gauche) et parallèle (droite)

Proposition 4 (Analogie problème géométrique direct / commande)

La résolution numérique du problème géométrique direct par les algorithmes de descente pour un robot parallèle est équivalent à la commande articulaire virtuelle de ce robot par actionnement virtuel de l'organe terminal.

Notons que cette résolution peut également être faite de manière certifiée en ayant recours à l'analyse par intervalles [Mer04, Mer04]. Ceci ouvre la porte, en lien avec la proposition ci-dessus, à une nouvelle approche pour la commande dont les performances pourraient être certifiées.

Pour finir cette partie modélisation, nous pouvons résumer la dualité entre robots sériels et robots parallèles par la Figure 2.2, dans laquelle nous faisons figurer les relations entre les différents espaces impliqués par la commande par vision : espace cartésien, espace articulaire et plan image. En vert figurent les passages analytiques et en pointillés rouges figurent les passages nécessitant la résolution de problèmes non linéaires.

Ainsi, l'image est une image (*sic !*) de la pose d'un robot sériel, elle-même image de l'état de ce dernier. A l'inverse, l'image et la configuration articulaire sont des images concomitantes de l'état d'un robot parallèle.

2.4 Commande

Il existe plusieurs schémas de commande cinématique, nécessitant plus ou moins d'effort de modélisation et de précision des modèles utilisés. Suivant l'ordre chronologique de mise en œuvre habituelle sur un robot sériel, il s'agit de :

- la commande articulaire ;
- la commande cartésienne ;
- la commande référencée capteurs, dont l'asservissement visuel est un cas particulier.

Rappelons qu'elles reposent toutes sur l'absence d'effets dynamiques ou sur leur compensation par une boucle interne.

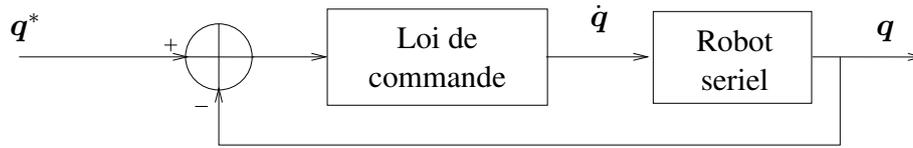


FIG. 2.3 – Schéma de commande articulaire, cas sériel

2.4.1 Propriétés dans le cas sériel

Rappelons brièvement les avantages et inconvénients des schémas de commande ci-dessus dans le cas de leur application à des robots sériels, en détaillant de surcroît le cas de l'asservissement visuel.

Commande articulaire

Formellement, la commande articulaire d'un robot sériel correspond à la minimisation par algorithme de descente (Gauss-Newton amorti) du problème quadratique suivant :

$$\min_{\mathbf{q}} \frac{1}{2} \|\mathbf{q}^* - \mathbf{q}\|^2 \quad (2.28)$$

où la notation \mathbf{q}^* désigne la consigne, et aboutit, dans le cas d'une commande proportionnelle, à la consigne de vitesse envoyée aux moteurs :

$$\dot{\mathbf{q}}^{cde} = \lambda(\mathbf{q}^* - \mathbf{q}), \quad \lambda > 0 \quad (2.29)$$

L'état d'un robot sériel étant sa configuration articulaire (Proposition 1), toute l'information nécessaire à la commande est fournie par les codeurs articulaires (Figure 2.3). La commande articulaire permet ainsi de se passer de tout modèle géométrique et cinématique du robot, à condition de pouvoir définir la tâche à réaliser directement dans l'espace articulaire. De plus, cette commande ne possède aucune singularité.

Cette simplicité explique le fort essor qu'ont eu les robots sériels dans l'industrie manufacturière dès la deuxième moitié du XX^e siècle. En effet, pour que le robot remplace l'homme sur des opérations fastidieuses et répétitives, il « n'y avait qu'à » apprendre la tâche par enregistrement des mouvements du robot réalisés une unique fois de manière manuelle. En revanche, cette simplicité est à notre sens la plus grande source de mauvaises habitudes qui perdurent en robotique.

Néanmoins, avec l'augmentation de la complexité des tâches à réaliser, l'apprentissage n'est pas la panacée. Aussi faut-il souvent faire précéder la commande articulaire d'une phase de conversion d'une consigne cartésienne en une consigne articulaire. En effet, l'espace articulaire est un tant soit peu tourmenté, et il est beaucoup plus simple pour l'être humain de raisonner dans l'espace cartésien.

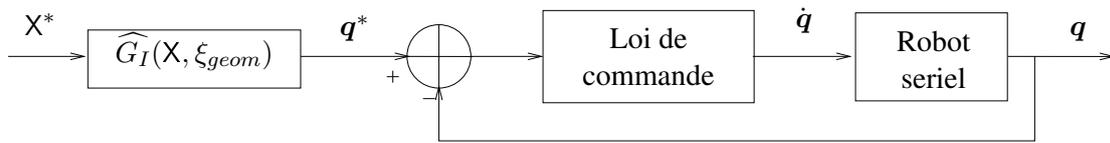


FIG. 2.4 – Schéma de commande articulaire avec consigne cartésienne, cas sériel

La cinématique du robot sériel vient donc faire une brève apparition dans la commande articulaire (Figure 2.4) par l'intermédiaire du modèle géométrique inverse, s'il existe, ou par la résolution du problème géométrique inverse, de manière générale.

Dans ce cas, l'inconvénient majeur de la commande articulaire est que la convergence vers la consigne cartésienne n'est pas assurée. En effet, deux conditions sont nécessaires pour que la convergence articulaire implique la convergence vers la consigne cartésienne.

La première condition est que la géométrie du robot ne varie pas au cours du temps, ce qui ne peut être formellement garanti. La seconde est que la résolution du problème géométrique inverse soit parfaite, ce qui ne peut être garanti non plus, à cause des erreurs numériques et des inévitables différences entre le modèle et la réalité mécanique du robot.

Dans les deux cas, la conséquence est que la convergence articulaire n'assure qu'une convergence vers une valeur biaisée de la consigne cartésienne. Ce biais, appelé *justesse* du robot par les métrologues, peut être en pratique compensé de plusieurs manières afin d'atteindre la justesse désirée du robot :

- Approche mécanique : il s'agit de donner une justesse intrinsèque au robot, indépendamment de sa commande, par la rigidification des éléments, le resserrement des tolérances de fabrication et d'assemblage, l'insertion de dispositifs mécaniques de réglage et d'ajustement.
- Approche automatique : il s'agit de donner au robot sa justesse par la commande, ce qui se traduit ici, par la résolution précise du problème géométrique inverse. A son tour, cela signifie, sous l'hypothèse d'une modélisation suffisante, une estimation précise des valeurs numériques des paramètres intervenant dans le modèle, objet de l'identification géométrique.

Ces deux approches ne sont pas forcément antagonistes, puisqu'il est illusoire de vouloir maîtriser totalement la mécanique indépendamment de la commande, et qu'il est également illusoire de réaliser une commande précise avec une réalisation mécanique bâclée.

Enfin, si l'on revient sur l'analogie pour un robot sériel entre problème géométrique inverse et commande cartésienne (Proposition 2), on se rend bien compte que dans sa version élaborée, la commande articulaire se double d'une commande cartésienne virtuelle. Autant donc faire carrément une commande cartésienne réelle !

Commande cartésienne

Formellement, puisque pour un robot sériel, la pose de l'organe terminal est définie à partir de l'état \mathbf{q} et du modèle géométrique direct, sa commande cartésienne correspond à la minimisation par algorithme de descente du problème non-linéaire suivant :

$$\min_{\mathbf{q}} \frac{1}{2} \|\mathbf{X}^* - \mathbf{X}\|^2 \quad (2.30)$$

qu'on écrira plutôt

$$\min_{\mathbf{q}} \frac{1}{2} \|\mathbf{X}^* - G_D(\mathbf{q}, \xi_{geom})\|^2 \quad (2.31)$$

pour exhiber la dépendance aux variables articulaires.

Ainsi, la commande proportionnelle par linéarisation exacte (Figure 2.5) correspond tout simplement à un algorithme de Gauss-Newton amorti :

$$\dot{\mathbf{q}}^{cde} = \lambda \widehat{\mathbf{C}}_D(\mathbf{q}, \xi_{geom})^{-1} (\mathbf{X}^* - \widehat{G}_D(\mathbf{q}, \xi_{geom})) \quad (2.32)$$

où $\widehat{\mathbf{C}}_D$ et \widehat{G}_D sont les estimées respectives de \mathbf{C}_D et G_D à chaque itération, obtenues à partir des paramètres géométriques identifiés et des valeurs articulaires mesurées. Pour simplifier la notation, nous omettrons le chapeau dans les schémas-blocs de commande. Rappelons également que la notation $\mathbf{C}_D(\dots)^{-1}$ est abusive au voisinage des singularités de la matrice cinématique directe.

Alternativement, la commande proportionnelle par linéarisation tangente est obtenue en ne considérant que la matrice cinématique inverse à l'équilibre (c'est-à-dire quand l'erreur régulée est nulle) :

$$\dot{\mathbf{q}}^{cde} = \lambda \widehat{\mathbf{C}}_D(\mathbf{q}^*, \xi_{geom})^{-1} (\mathbf{X}^* - \widehat{G}_D(\mathbf{q}, \xi_{geom})) \quad (2.33)$$

Les avantages de la commande cartésienne sont qu'elle prend bien en compte la cinématique du robot et qu'elle permet une définition intuitive de la consigne.

En revanche, puisque cette commande est une commande référencée modèle, elle ne peut garantir la convergence vers la consigne cartésienne désirée qu'au prix d'une identification très précise du modèle géométrique direct. En effet, la régulation ne se fait pas directement sur un signal capteur, mais sur un signal reconstruit par un modèle, ce qui requiert que le modèle corresponde parfaitement au procédé.

Commande référencée capteurs

Avertissement Cette présentation de la commande référencée capteurs est volontairement succincte et simplifiée. Le lecteur intéressé par de plus amples détails se référera à [SLBE91]. En particulier, nous ne traitons que le cas d'une commande

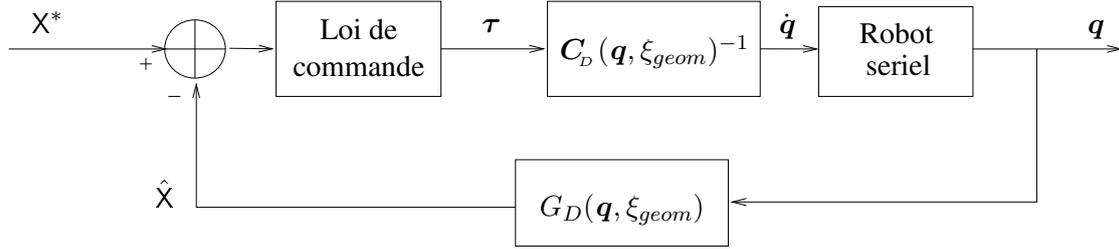


FIG. 2.5 – Schéma de commande cartésienne, cas sériel

référéncée capteurs ayant pour but un positionnement cartésien fixe. Nous ne traitons pas ici les cas de consigne variable dans le temps ou de liaisons virtuelles autre qu'encastrement.

La modélisation de tous les phénomènes mécaniques intervenant dans un robot est illusoire, aussi est-il plus intéressant de pouvoir obtenir des informations dans l'espace même de la tâche à réaliser par le biais de capteurs. Dans le cas de capteurs mesurant des grandeurs relatives à l'espace cartésien (positions, distances, angles, vitesses, etc.) on dispose alors d'un signal \mathbf{s} fonction (en général, non-linéaire) de la pose relative du capteur et de la cible :

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}(X) \quad (2.34)$$

La relation ci-dessus définit une liaison virtuelle d'encastrement s'il y a bijectivité entre le signal capteur et la pose. Dans ce cas, la réalisation de la consigne dans l'espace capteur assure la réalisation de la consigne cartésienne. Dans le cas où le signal est de dimension supérieure à celle de la pose, il faut s'assurer de la surjectivité de la relation ci-dessus : à un signal capteur ne doit correspondre qu'une seule pose. Pour un exposé plus détaillé et plus formel, le lecteur est renvoyé à [SLBE91] où est développée la notion de fonction de tâche.

Dans le cas d'un robot sériel, le signal capteur est donc une image de la pose, image elle-même de la configuration articulaire, l'état, du robot :

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}(X(\mathbf{q}, \xi_{geom})) \quad (2.35)$$

La commande référéncée capteurs correspond alors à la minimisation par l'algorithme de Gauss-Newton amorti du problème suivant :

$$\min_{\mathbf{q}} \frac{1}{2} \|\mathbf{s}^* - \mathbf{s}\|^2 \quad (2.36)$$

Pour cela, on procède en deux étapes pour aboutir au schéma de commande (Figure 2.6) :

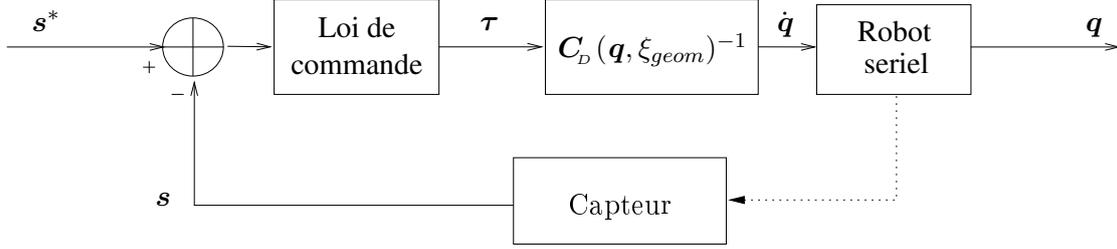


FIG. 2.6 – Schéma de commande référencée capteurs, cas sériel

Etape 1 Expression de la dérivée du signal capteur indépendamment de la cinématique du robot ;

La dérivée temporelle du signal capteur s'écrit :

$$\dot{\mathbf{s}} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{X}} \dot{\mathbf{X}} \quad (2.37)$$

qui est exprimée en fonction du torseur cinématique de déplacement relatif entre le capteur et sa cible :

$$\dot{\mathbf{s}} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{X}} \mathbf{A} \boldsymbol{\tau} \quad (2.38)$$

où, ici encore, la matrice \mathbf{A} dépend de la représentation choisie pour la pose.

Indépendamment du robot considéré, on obtient ainsi la *matrice d'interaction*, que l'on pourrait qualifier de matrice cinématique capteur (par analogie avec le §2.3.2) puisqu'elle relie la variation temporelle du signal au torseur cinématique :

$$\mathbf{L}_s^T = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{X}} \mathbf{A} \quad (2.39)$$

permettant d'écrire une pseudo-commande dans l'espace cartésien de la forme :

$$\boldsymbol{\tau}^{cde} = \lambda \widehat{\mathbf{L}}_s^{T+} (\mathbf{s}^* - \mathbf{s}), \quad \lambda > 0 \quad (2.40)$$

où $+$ désigne une pseudo-inverse à gauche : $\mathbf{L}_s^{T+} \mathbf{L}_s^T = \mathbf{I}$ et $\widehat{\mathbf{L}}_s^T$ désigne une estimée numérique de \mathbf{L}_s^T .

En reportant cette commande dans l'évolution de l'erreur $\mathbf{e} = \mathbf{s}^* - \mathbf{s}$ (équation de la boucle fermée), on obtient ainsi :

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{L}_s^T \widehat{\mathbf{L}}_s^{T+} \mathbf{e} \quad (2.41)$$

La convergence exponentielle est assurée si le produit $\mathbf{L}_s^T \widehat{\mathbf{L}}_s^{T+}$ entre la matrice d'interaction réelle et celle utilisée pour la commande est une matrice définie positive. Or, cette condition ne peut être assurée si le signal \mathbf{s} est de dimension n supérieure

à 6, dimension de $SE(3)$. En effet, le rang de \mathbf{L}_s^T est au maximum de 6. Ainsi, le produit $\mathbf{L}_s^T \widehat{\mathbf{L}}_s^{T+}$ est une matrice $n \times n$ de rang 6 au maximum, il ne peut donc être, au mieux, que semi-défini positif. Sous cette dernière condition, on ne peut garantir la convergence de l'erreur \mathbf{e} à 0.

En revanche, on peut établir aisément le théorème de stabilité suivant :

Proposition 5 (Condition de stabilité)

La commande référencée capteurs assure que l'erreur régulée sera bornée sous perturbations bornées si le produit $\mathbf{L}_s^T \widehat{\mathbf{L}}_s^{T+}$ est une matrice semi-définie positive :

$$\forall \mathbf{s}, {}^t \mathbf{s} \mathbf{L}_s^T \widehat{\mathbf{L}}_s^{T+} \mathbf{s} \geq 0 \quad (2.42)$$

Cette condition de stabilité s'interprète intuitivement comme le fait que la commande doit « tirer dans le bon sens » : l'estimée $\widehat{\mathbf{L}}_s^T$ utilisée dans la commande doit être suffisamment proche de \mathbf{L}_s^T pour ne pas changer l'orientation de la vitesse cartésienne de commande de 90 degrés ou plus.

Une présentation alternative du problème considère la régulation à 0 d'une fonction d'erreur $\mathbf{e}' = \mathbf{C}(\mathbf{s}^* - \mathbf{s})$ et choisit la commande proportionnelle $\boldsymbol{\tau}^{cde} = \lambda \mathbf{e}'$. En faisant le choix classique de $\mathbf{C} = \widehat{\mathbf{L}}_s^{T+}$, on aboutit *exactement à la même commande que précédemment*, mais l'équation de boucle fermée devient :

$$\dot{\mathbf{e}}' = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}_s^{T+} \mathbf{L}_s^T \mathbf{e}' \quad (2.43)$$

qui est stable si le produit $\widehat{\mathbf{L}}_s^{T+} \mathbf{L}_s^T$ est défini positif. Désormais, les dimensions sont compatibles et cette condition est possible.

Comment se fait-il que la même commande soit stable d'une manière et pas de l'autre? Tout vient du fait qu'on ne regarde pas la même erreur : cette même commande ne peut garantir la convergence de l'erreur $\mathbf{e} = \mathbf{s}^* - \mathbf{s}$ mais garantit la convergence de l'erreur $\mathbf{e}' = \widehat{\mathbf{L}}_s^{T+}(\mathbf{s}^* - \mathbf{s})$. Or, puisque \mathbf{L}_s^T est de rang 6, inférieur à la dimension de \mathbf{s} , on peut avoir $\widehat{\mathbf{L}}_s^{T+}(\mathbf{s}^* - \mathbf{s}) = 0$ (convergence de \mathbf{e}') sans pourtant avoir $\mathbf{s} = \mathbf{s}^*$. Par ailleurs, considérons l'erreur \mathbf{e} bloquée dans un minimum local. Cela veut dire que, sans que l'on ait $\mathbf{s} = \mathbf{s}^*$, on a $\boldsymbol{\tau}^{cde} = 0$, qui donne justement $\widehat{\mathbf{L}}_s^{T+}(\mathbf{s}^* - \mathbf{s}) = 0$. Nous sommes bien retombés sur nos pattes.

En conclusion de cette discussion, il s'avère qu'une commande référencée capteurs peut avoir des minima locaux si la dimension du signal est supérieure à 6. C'est somme toute normal. En effet, si l'on se rappelle que le problème de commande est équivalent à un problème de minimisation de moindres carrés, on comprend bien qu'à moins d'une chance inouïe, la simple présence de bruits de mesure empêche l'annulation de chaque composante du vecteur d'erreur.

A notre idée, il ne faut donc en pratique pas trop s'inquiéter de ces minima locaux *si l'on s'est bien assuré que le signal est constitué de manière correcte* (cf. la notion de tâche admissible), en ce sens qu'en l'absence de bruit, le critère de minimisation s'annule et qu'alors la consigne cartésienne est atteinte. Il faut surtout retenir que la condition de stabilité énoncée n'est pas très contraignante sur la qualité de l'estimation de la matrice d'interaction, ce qui assure une bonne robustesse pratique à la commande référencée capteurs.

Etape 2 Exploitation de la cinématique du robot.

On applique ensuite la pseudo-commande ci-dessus au robot considéré via le modèle cinématique inverse :

$$\dot{\mathbf{q}}^{cde} = \widehat{\mathbf{C}}_D(\mathbf{q}, \xi_{geom})^{-1} \boldsymbol{\tau}^{cde} = \lambda \widehat{\mathbf{C}}_D(\mathbf{q}, \xi_{geom})^{-1} \widehat{\mathbf{L}}_s^T (\mathbf{s}^* - \mathbf{s}) \quad (2.44)$$

L'intérêt de cette commande est que si l'on régule effectivement l'erreur au niveau du signal, les modèles n'interviennent qu'au niveau cinématique (modèle cinématique inverse et matrice d'interaction). Il n'y a donc aucune reconstruction (estimation géométrique) pouvant amplifier les bruits de mesure.

En revanche, si le but de la commande référencée capteurs est la régulation dans l'espace cartésien, il faut s'assurer que le signal de consigne soit bien une image univoque de la consigne cartésienne. L'inconvénient de cette commande, qui rejoint d'une certaine manière la commande articulaire, est donc qu'il faut convertir une consigne cartésienne en un signal de consigne. Cela peut se faire par apprentissage ou par exploitation du modèle géométrique du capteur. Néanmoins, l'apprentissage est un apprentissage référencé capteur et non un apprentissage référencé robot, comme dans le cas articulaire. Il est donc aisément répétable d'un robot à un autre. Quant aux modèles géométriques associés aux capteurs, ils sont en général beaucoup plus fiables et simples que le modèle géométrique d'un robot car ils mettent en jeu des phénomènes physiques relativement simples (par exemple, de type ondulatoire) et peu nombreux, au regard des phénomènes apparaissant dans une chaîne cinématique.

Remarque 1

Il arrive fréquemment que l'on retrouve des termes dépendant de X et de divers paramètres (géométriques, capteurs) dans la matrice d'interaction qu'il faut pouvoir reconstruire à partir de \mathbf{s} ou estimer comme on peut. Donc, en toute rigueur, il faut écrire la matrice d'interaction :

$$\mathbf{L}_s^T(\mathbf{s}, \widehat{X}, \widehat{\xi}) \quad (2.45)$$

Asservissement visuel

Avertissement Ici encore, notre volonté n'est pas de faire un état de l'art exhaustif en asservissement visuel, mais plutôt d'en exhiber quelques concepts clés. Le lecteur

intéressé par plus de détails se référera à [CC003].

L'*asservissement visuel* est une classe particulière de la commande référencée capteurs, dans laquelle le capteur utilisé est une (voire plusieurs) caméras. Elle possède deux avantages majeurs : la perception sans contact et la richesse du signal obtenu. Elle est sujette à quelques restrictions de mise en œuvre : conditions d'éclairage, fréquence d'acquisition et rapport précision/volume d'observation.

Les méthodes d'asservissement visuel se répartissent en de nombreux types, selon les primitives géométriques observées : points, droites, cercles, moments, etc.

Les méthodes d'asservissement visuel peuvent également être classés selon l'espace dans lequel la commande se fait : image, image normalisée, espace cartésien ou espace hybride des précédents, voire encore espace invariant aux paramètres intrinsèques [MBR02]. Elles se différencient par leur degré de reconstruction, donc de confiance en les paramètres du modèle de projection, et donc d'étalonnage (identification) de la (ou des) caméra. On considère ainsi généralement que plus le signal régulé est proche de l'image, plus complexe sera la commande mais plus faibles seront les risques de biais de convergence, car les modèles utilisés seront plutôt de type cinématique. A l'inverse, plus le signal régulé nécessite de reconstruction, plus la commande sera simple mais moins la commande sera robuste aux erreurs de modèles, car ceux-ci seront plutôt de type géométrique. A cela, il faut ajouter également que si, pour des raisons de robustesse aux bruits de détection dans l'image, on travaille sur un nombre de primitives image plus grand que nécessaire, l'asservissement visuel image possèdera des minimas locaux [Cha98b] alors qu'un asservissement visuel dans l'espace cartésien conservera ses propriétés et profitera directement de la robustesse accrue.

Enfin, on distingue les mises en œuvre dans lesquelles la caméra est solidaire de l'organe terminal du robot (*asservissement visuel embarqué*) de celles dans lesquelles la caméra observe l'organe terminal du robot (*asservissement visuel déporté*). Dans le second cas, la caméra observe, à notre connaissance, toujours une cible artificielle (damier, points blancs sur fond noir), alors que dans le premier, la cible artificielle n'est pas obligatoire, mais est quand même souvent utilisée afin de simplifier le traitement d'image.

2.4.2 Commande articulaire dans le cas parallèle

Après ce bref passage en revue des techniques de commande utilisées en robotique sérielle, nous nous attachons désormais à voir comment elles s'adaptent en robotique parallèle, en commençant par la commande articulaire.

Cette commande articulaire est un aussi mauvais choix que dans le cas sériel, si on se contente de l'appliquer telle quelle, voire même pire. En effet, la commande articulaire toute simple (2.29) ne prend pas en compte la cinématique du robot. Dans le cas d'un robot parallèle, c'est extrêmement gênant puisque les contraintes

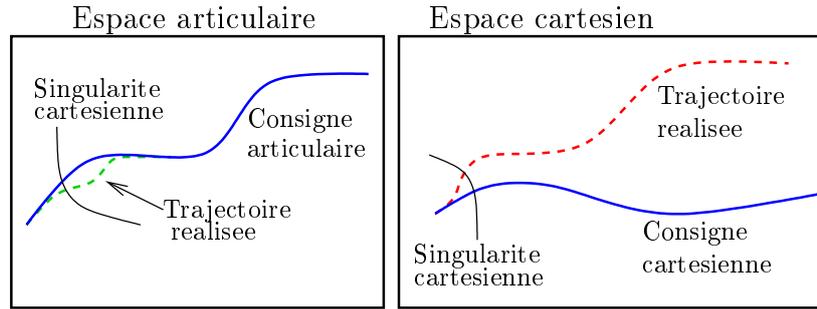


FIG. 2.7 – La convergence dans l'espace articulaire ne garantit pas la convergence dans l'espace cartésien.

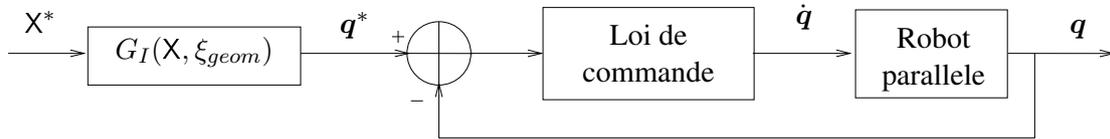


FIG. 2.8 – Schéma de commande articulaire avec consigne cartésienne, cas parallèle

de fermeture des chaînes cinématiques sont complètement ignorées, ce qui peut générer d'importants efforts internes dans le mécanisme [DM98]. De plus, on retombe sur le problème dû au fait que la configuration articulaire n'est pas l'état du robot parallèle. En effet, puisqu'il peut exister plusieurs poses de l'organe terminal pour une même configuration articulaire, la convergence dans l'espace articulaire ne garantit pas la convergence dans l'espace cartésien (Figure 2.7), notamment au voisinage des singularités cartésiennes. Aussi, en pratique, doit-on planifier une trajectoire cartésienne, passant à l'écart des singularités, pour un simple déplacement point à point, puis convertir cette trajectoire cartésienne en trajectoire de consigne articulaire par le biais du modèle géométrique inverse. Néanmoins, rien ne garantit que cette solution fonctionnera en présence de perturbations lors de la commande : la trajectoire planifiée passe-t-elle assez « loin » de la singularité ? Enfin, il faut que le modèle géométrique inverse soit parfaitement représentatif du comportement réel du robot (complétude, identification précise) pour deux raisons : validité de la trajectoire planifiée et biais de convergence.

En revanche, la commande articulaire sans prise en compte de la cinématique et avec une consigne purement articulaire est bien pratique pour faire faire les premiers « tours de roue » à un robot parallèle et démontrer un nouveau concept cinématique. Mais attention à ne pas en abuser !

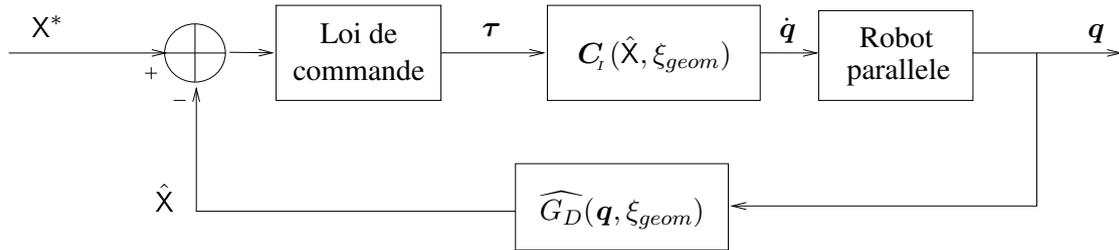


FIG. 2.9 – Commande cartésienne, cas parallèle

2.4.3 Commande cartésienne dans le cas parallèle

Si la commande articulaire d'un robot parallèle, même revue, n'est pas une bonne idée, la commande cartésienne est encore pire. Cela semble paradoxal au vu de l'expérience de la robotique sérielle, et pourtant !

Si l'on reprend le schéma de commande cartésienne (Figure 2.5) et qu'on le transpose au cas parallèle (Figure 2.9), on se rend compte que la régulation se fait bien dans l'espace d'état du robot parallèle, ce qui est plutôt une bonne nouvelle par rapport au cas sériel, mais à quel prix ! En effet, la boucle de retour se referme sur la résolution du problème géométrique direct, dont nous avons vu :

1. qu'il n'avait pas de solution simple ;
2. que sa version numérique n'était autre qu'une commande articulaire virtuelle par actionnement virtuel de l'organe terminal, avec le risque de convergence vers la mauvaise solution ;
3. qu'il donnait une estimation forcément biaisée de la pose de l'organe terminal à cause des phénomènes mécaniques non modélisables et des erreurs d'identification.

En revanche, la matrice cinématique inverse a désormais une expression analytique, fonction du signal régulé, au lieu d'être obtenu par inversion numérique de la matrice cinématique directe (cas sériel). De plus, puisque le signal régulé est l'état du robot, il sera très simple de le programmer et l'apprentissage sera répétable d'un robot à un autre, mais comment mesurer X si les codeurs q en sont de mauvais marqueurs ?

En conséquence, nous avons ici une commande coûteuse en temps de calcul, nécessitant une identification précise, et sans garantie de convergence vers la consigne cartésienne, mais qui a lieu dans le bon espace. Finalement, la commande articulaire n'est pas si mal, sauf que le signal régulé n'est pas le bon. Charybde ou Scylla ?

2.4.4 Commande référencée capteurs dans le cas parallèle

Dans une commande référencée capteurs, on s'asservit sur un signal capteur s , image de X , avec la garantie que la consigne cartésienne soit atteinte si et seulement

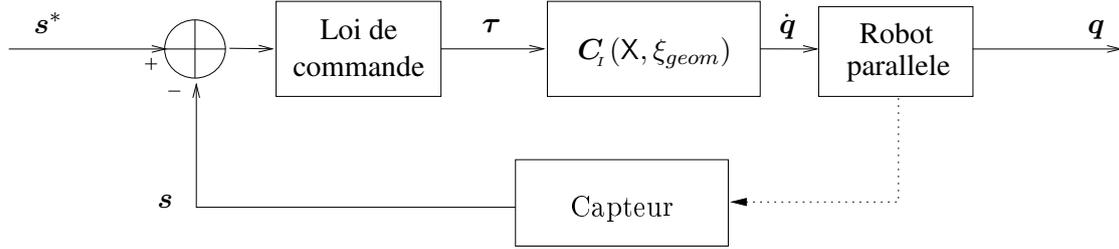


FIG. 2.10 – Schéma de commande référencée capteurs, cas parallèle

si la fonction $\mathbf{s} = \mathbf{s}(\mathbf{X})$ est surjective. Son schéma (Figure 2.10) présente peu de différence avec le schéma de commande référencée capteurs dans le cas sériel, si ce n'est qu'à l'instar de la commande cartésienne d'un robot parallèle, la matrice cinématique inverse a une expression analytique, fonction de l'état du système. Encore faut-il pouvoir reconstruire cet état... « *Mince, on tourne en rond! Mince, on tourne en rond!* »

Au passage, notons que, puisque les valeurs articulaires \mathbf{q} sont une image de l'état \mathbf{X} du robot, la commande articulaire d'un robot parallèle n'est rien d'autre qu'une commande référencée capteurs d'un robot parallèle dans laquelle la matrice d'interaction (ou matrice cinématique capteur) est la matrice cinématique inverse :

$$\mathbf{L}_{\mathbf{q}}^T = \mathbf{C}_I(\mathbf{X}, \xi_{geom}) \quad (2.46)$$

Par conséquent, la commande articulaire d'un robot parallèle s'écrit de manière « propre » :

$$\dot{\mathbf{q}}^{cde} = \lambda \widehat{\mathbf{C}}_I(\mathbf{X}, \xi_{geom}) \widehat{\mathbf{C}}_I(\mathbf{X}, \xi_{geom})^+ (\mathbf{q}^* - \mathbf{q}) \quad (2.47)$$

qui ne revient à la commande articulaire toute simple (2.29) que dans le cas où la matrice cinématique inverse est inversible. Dans les autres cas (singularités, matrice cinématique inverse rectangulaire), la présence de la matrice cinématique inverse comme facteur le plus à gauche de l'expression garantit que les vitesses articulaires générées par cette commande seront compatibles avec les contraintes cinématiques. Les efforts internes seront donc limités.

Néanmoins, cette version revue de la commande articulaire ne règle pas tout puisque la condition de surjectivité de la commande référencée capteurs n'est pas vérifiée : il peut exister plusieurs \mathbf{s} ($= \mathbf{q}$) pour le même \mathbf{X} .

2.4.5 Asservissement visuel dans le cas parallèle

Et si la solution venait de la vision ? En effet, nous avons vu que la vision permettait la mesure de la pose d'une cible par rapport à une caméra. Par conséquent, si la cible et la caméra sont liées à la base et à l'organe terminal du robot parallèle,

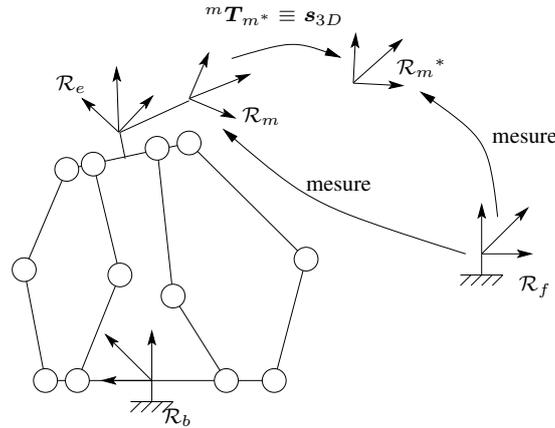


FIG. 2.11 – Dispositif générique pour l’asservissement visuel d’un robot parallèle quelconque.

cette pose caméra-cible sera équivalente à la pose base-organe terminal, ce qui nous permet de formuler le théorème suivant :

Proposition 6 (Vision et état d’un robot parallèle)

La pose fournie par un système de vision, dans un dispositif expérimental classique d’asservissement visuel (embarqué ou déporté) représente entièrement l’état d’un robot parallèle.

Cette mesure par vision est *a priori* plus simple qu’une reconstruction par résolution du problème géométrique direct car le modèle de projection est plus simple et a moins de paramètres que le modèle géométrique inverse.

S’il n’existe pas de solution exacte au problème de calcul de pose, les solutions numériques disponibles sont très robustes et bénéficient de la possibilité d’accumuler les points de mesure sur la cible pour augmenter la précision, ce qui est impossible pour le problème géométrique direct à partir des seules mesures articulaires dans les moteurs. Aussi une estimation de la pose de l’organe terminal du robot par rapport à sa base par vision est-elle préférable à son estimation par la cinématique du robot.

Comme la pose de l’organe terminal est nécessaire pour renseigner la matrice cinématique inverse, le calcul de pose est donc incontournable. Cette estimation de la pose est donc trivialement utilisable pour faire un asservissement visuel de type 3D pose des robots parallèles, que nous allons formaliser.

Formalisation Considérons un mécanisme parallèle quelconque équipé d’une caméra et d’une mire, sans préjuger de la configuration (asservissement visuel embarqué ou déporté). Ainsi, la caméra peut être fixe par rapport à la base ou solidaire de l’organe terminal et la mire également de manière complémentaire. De manière

générique (Figure 2.11) , on a donc un repère fixe \mathcal{R}_f , rigidement lié au repère de base \mathcal{R}_b et un repère mobile \mathcal{R}_m en même temps que le repère organe terminal \mathcal{R}_e .

Selon [TMCG02], le signal \mathbf{s} qui doit être choisi pour l'asservissement 3D pose, indépendamment du type de robot, est l'écart entre la pose courante mesurée \mathbf{X} et la pose désirée \mathbf{X}^* et cet écart doit être représenté par :

$$\mathbf{s}_{3D} = \begin{pmatrix} {}^m \mathbf{t}_{m^*} \\ \underline{\mathbf{a}}\alpha \end{pmatrix} \quad (2.48)$$

où $\underline{\mathbf{a}}$ et α sont l'axe et l'angle de la rotation résiduelle ${}^m \mathbf{R}_{m^*}$ entre le repère \mathcal{R}_m courant et le repère \mathcal{R}_{m^*} de consigne, et ${}^m \mathbf{t}_{m^*}$ est la position du repère \mathcal{R}_m exprimée dans le repère \mathcal{R}_{m^*} . A l'équilibre, le signal est donc nul :

$$\mathbf{s}_{3D}^* = \mathbf{0}_{6 \times 1} \quad (2.49)$$

La dérivée temporelle de ce signal :

$$\dot{\mathbf{s}}_{3D} = \mathbf{L}_{\mathbf{s}_{3D}}^T {}^m \boldsymbol{\tau}_m \quad (2.50)$$

fait apparaître la vitesse cartésienne instantanée du repère mobile relativement à lui-même et la matrice d'interaction suivante [MCB99, TMCG02] :

$$\mathbf{L}_{\mathbf{s}_{3D}}^T = \begin{pmatrix} -\mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{L}_\omega^T \end{pmatrix} \quad (2.51)$$

avec

$$\mathbf{L}_\omega^T = \mathbf{I}_3 - \frac{\alpha}{2} [\underline{\mathbf{a}}]_\wedge + \left(1 - \frac{\sin_c \alpha}{(\sin_c \frac{\alpha}{2})^2} \right) [\underline{\mathbf{a}}]_\wedge^2 \quad (2.52)$$

Notons que l'expression de $\mathbf{L}_{\mathbf{s}_{3D}}^T$ à l'équilibre est des plus simples :

$$\mathbf{L}_{\mathbf{s}_{3D}^*}^T = \begin{pmatrix} -\mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 \end{pmatrix} \quad (2.53)$$

ce qui permet une pseudo-commande dans l'espace cartésien par linéarisation tangente sans la moindre approximation.

Par ailleurs [MCB99], la matrice \mathbf{L}_ω^T possédant une inverse exprimable analytiquement, la matrice $\mathbf{L}_{\mathbf{s}_{3D}}^T$ est également inversible analytiquement :

$$\mathbf{L}_{\mathbf{s}_{3D}}^{T^{-1}} = \begin{pmatrix} -\mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{L}_\omega^{T^{-1}} \end{pmatrix} \quad (2.54)$$

ce qui rend la pseudo-commande par linéarisation exacte à peine plus complexe que la pseudo-commande par linéarisation tangente.

Dans les deux cas, la pseudo-commande dans l'espace cartésien fournit la vitesse du repère mobile relativement à lui-même :

$${}^m\boldsymbol{\tau}_m^{cde} = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}_{3D}}^T{}^{-1} \mathbf{s} \quad (2.55)$$

où $\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{s}_{3D}}^T$ est donnée par l'une des deux expressions précédentes. Dans les deux cas, la pseudo-commande dans l'espace cartésien est une commande par retour d'état non-linéaire [CI27].

Ce torseur cinématique doit être converti dans un premier temps en le torseur cinématique de l'organe terminal, encore indépendamment du type de robot considéré, puis dans un deuxième temps en vitesses articulaires en prenant en compte la cinématique du robot.

Le premier pas se fait, comme d'habitude, par changement de repère et de point d'application du torseur :

$${}^e\boldsymbol{\tau}_e^{cde} = \begin{pmatrix} {}^e\mathbf{R}_m & [{}^e\mathbf{t}_m]_{\wedge} {}^e\mathbf{R}_m \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}^e\mathbf{R}_m \end{pmatrix} {}^m\boldsymbol{\tau}_m^{cde} \quad (2.56)$$

où ${}^e\mathbf{R}_m$ et ${}^e\mathbf{t}_m$ définissent la pose *constante* du repère mobile par rapport au repère organe terminal.

La différence par rapport au cas sériel vient uniquement sur le deuxième pas. En effet, la conversion du torseur en vitesse articulaire s'écrit dans le cas sériel :

$$\dot{\mathbf{q}}^{cde} = {}^e\widehat{\mathbf{C}}_{De}(\mathbf{q}, \xi_{geom})^{-1} {}^e\boldsymbol{\tau}_e^{cde} \quad (2.57)$$

avec une inversion numérique de la matrice cinématique directe, estimée à partir des variables articulaires, alors que dans le cas parallèle, la conversion s'écrit :

$$\dot{\mathbf{q}}^{cde} = {}^e\widehat{\mathbf{C}}_{Ie}(\mathbf{X}, \xi_{geom}) {}^e\boldsymbol{\tau}_e^{cde} \quad (2.58)$$

Par rapport au cas sériel, nous supprimons donc une inversion numérique et exhibons une dépendance formelle non plus en les variables articulaires \mathbf{q} mais de la pose \mathbf{X} .

Enfin, l'implantation effective de cette commande dans le cas embarqué ou déporté diffère uniquement par l'estimation de l'état, représenté en général par la transformation homogène ${}^b\mathbf{T}_e$ entre le repère de base et le repère organe terminal. Ainsi, dans le cas embarqué, nous aurons :

$${}^b\mathbf{T}_e = {}^b\mathbf{T}_o {}^c\mathbf{T}_o^{-1} {}^c\mathbf{T}_e \quad (2.59)$$

où ${}^c\mathbf{T}_o$ est la pose de la mire par rapport à la caméra, obtenue par vision alors que ${}^b\mathbf{T}_o$ et ${}^c\mathbf{T}_e$ sont les *paramètres externes* décrivant la pose fixe de la mire par rapport à la base et la pose fixe de l'organe terminal par rapport à la caméra. Dans le cas déporté, nous aurons :

$${}^b\mathbf{T}_e = {}^b\mathbf{T}_c {}^c\mathbf{T}_o {}^o\mathbf{T}_e \quad (2.60)$$

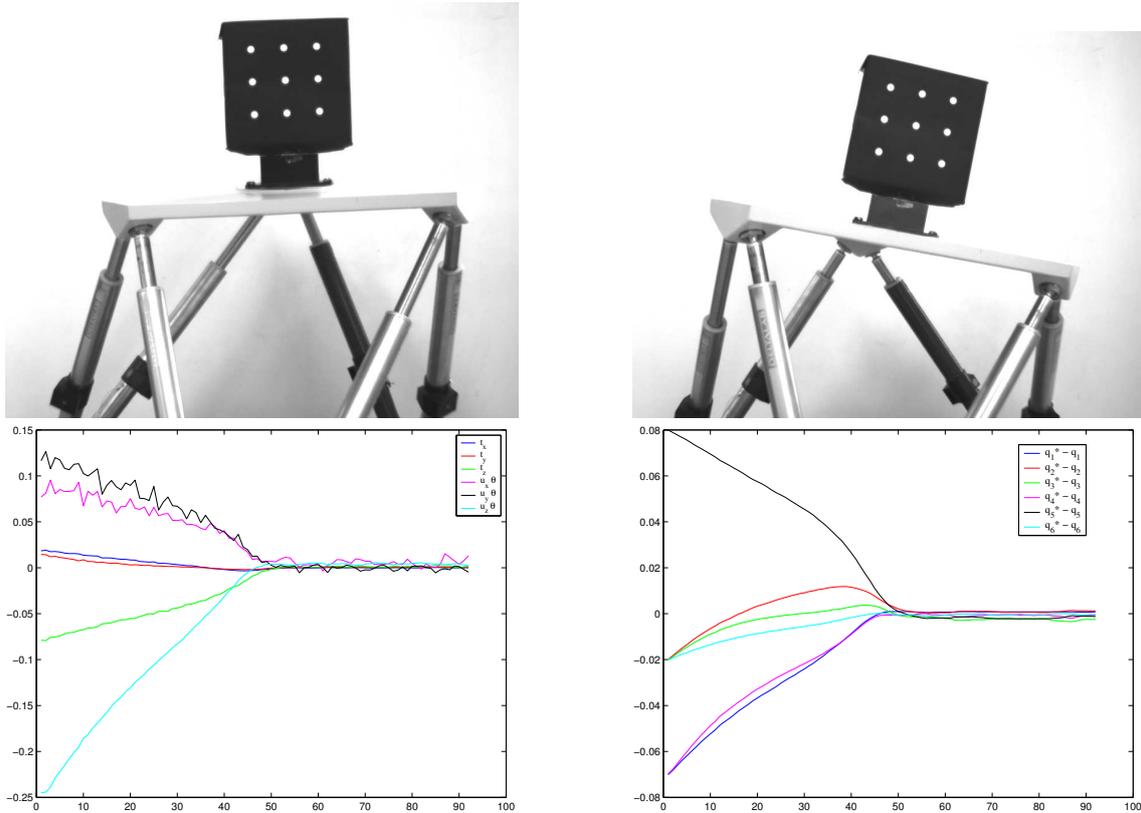


FIG. 2.12 – Asservissement visuel 3D de la plateforme de Gough-Stewart. Dans l'ordre de lecture : image initiale et de consigne, erreur réglée et erreur articulaire

où les paramètres externes sont désormais la pose de la caméra par rapport à la base bT_c et la pose de l'organe terminal par rapport à la mire oT_e .

Cette commande a été validée expérimentalement sur la plateforme de Gough-Stewart [CI27] dans le cas déportée (Figure 2.12). Pour cela, nous avons mis en place une architecture logicielle de commande ouverte basée sur Linux-RTAI¹ et la bibliothèque ViSP [MSC05] pour l'extraction et le suivi de la mire et les calculs matriciels. On remarquera que la convergence n'est pas exponentielle, car une stratégie de gain adaptatif a été mise en place pour compenser les frottements.

De ce qui précède, nous pouvons donc établir une propriété importante :

Propriété 4

La commande 3D pose d'un robot parallèle dépend de son état, des paramètres géométriques et des paramètres externes.

¹<http://www.rtai.org/>

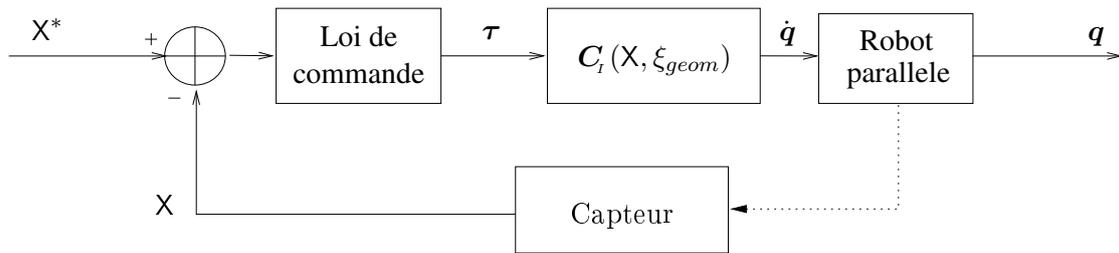


FIG. 2.13 – Asservissement visuel 3D pose, cas parallèle

et surtout son corollaire fondamental :

Proposition 7 (Indépendance aux variables articulaires)

La commande 3D pose d'un robot parallèle est indépendante des variables articulaires.

La preuve est immédiate premièrement en remarquant que le signal \mathbf{s}_{3D} est, dans le cas parallèle, la différence entre l'état \mathbf{X} courant et l'état désiré, et deuxièmement en listant les paramètres et variables intervenant dans les équations de commande ci-dessus.

En résumé, l'asservissement visuel de type 3D pose est la solution la plus immédiate et la plus simple d'un point de vue formel pour la commande des robots parallèles (Figure 2.13). En effet, cette commande possède une longue liste d'avantages :

- sa consigne est exprimée dans l'espace cartésien ;
- cette consigne est une consigne relative (et non absolue) par rapport à la cible ;
- le signal régulé est la seule variable intervenant dans la boucle de commande ;
- la trajectoire cartésienne pour un positionnement point-à-point est rectiligne ;
- aucune mesure articulaire n'est nécessaire, ce qui peut permettre de simplifier la conception mécanique.

En revanche, elle possède quelques inconvénients mineurs :

- l'ensemble des paramètres de commande est augmenté des paramètres externes ;
- Néanmoins, cela ne complexifie pas l'identification du modèle géométrique si celle-ci est faite par vision, comme nous le verrons au §2.5.
- la caméra doit être étalonnée ;
- le calcul de pose doit être le plus précis possible ;

En effet, si la pose estimée est erronée, la matrice cinématique inverse estimée le sera également, et les vitesses articulaires produites ne seront plus entièrement compatibles avec la cinématique. Des efforts internes pourront donc apparaître dans le mécanisme.

Une conséquence pratique de cette contrainte est qu'il faut s'assurer d'une détection très précise des cibles dans l'image.

Afin d'améliorer la précision de l'estimation de la pose, dans le cas où les codeurs articulaires restent présents dans le mécanisme, nous proposons ici d'estimer la pose de l'organe terminal en combinant le calcul de pose classique et la résolution numérique du problème géométrique direct. Cela se traduit, ici dans le cas déporté, par :

$$\min_{{}^b\mathbf{T}_e} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_{pts}} \|\mathbf{p}_k^{im} - (\mathbf{K} \quad \mathbf{0}_{3 \times 1}) {}^c\mathbf{T}_b {}^b\mathbf{T}_e {}^e\mathbf{T}_m {}^o\mathbf{P}_k\|^2 + \frac{\mu}{2} \|\mathbf{q} - G_I({}^b\mathbf{T}_e, \xi_{geom})\|^2 \quad (2.61)$$

En effet, l'exploitation additionnelle des informations proprioceptives (en général de bonne précision) peut améliorer l'estimation de la pose et les contraintes visuelles devraient empêcher d'aboutir à une solution erronée du problème géométrique direct.

- il faut lancer un calcul non-linéaire de pose à chaque itération ;
Néanmoins, une implémentation intelligente peut réduire le temps de calcul. Une première solution consiste à se contenter de l'estimation linéaire de la pose. Cela garantit un temps de calcul constant mais la précision de l'estimation peut être dégradée, avec le risque d'apparition d'efforts internes. Cette première solution n'est donc à utiliser qu'avec précaution. Une seconde solution consiste à supprimer la phase d'estimation linéaire de la pose et d'utiliser la pose calculée à l'itération précédente, comme initialisation de l'algorithme de descente, ce qui fera chuter le plus souvent le nombre d'itérations à un nombre très réduit.
- les trajectoires des points de la cible dans l'image ne sont pas contrôlées.
Un moyen de contourner ce problème est d'utiliser un autre type d'asservissement visuel (par exemple, asservissement visuel 2D1/2) qui a de bonnes propriétés dans l'image et dans l'espace cartésien. Cela est d'autant plus envisageable que la pose étant estimée, on peut en déduire toutes les informations nécessaires pour remplir les matrices d'interaction.
On peut également contourner le problème en faisant de la planification de trajectoire sous contraintes de visibilité. Cette solution est moins dans l'esprit d'une commande de positionnement qui nous intéresse ici, mais tout à fait pertinente pour les nombreuses applications de suivi de trajectoire.

De plus, le schéma d'asservissement visuel présenté ci-dessus fait l'hypothèse d'un repère fixe par rapport à la base, ce qui peut être limitant en pratique. En effet, le cas embarqué est fréquemment utilisé pour s'asservir sur une cible mobile et dans le cas déporté, il peut être utile d'avoir une caméra mobile, par exemple pour améliorer le suivi dans l'image.

Nous donnons ici quelques pistes pour contourner cette hypothèse. Le repère fixe n'étant plus fixe, nous l'appellerons donc repère à suivre. La première solution consiste à se fier à la réalisation effective du torseur cinématique du repère mobile requis par la commande et de l'intégrer temporellement pour avoir une estimation courante de la pose du repère mobile par rapport à la base et, par comparaison avec la pose mesurée du repère à suivre par rapport au repère mobile, en déduire une estimation de la pose du repère à suivre par rapport à la base. Une seconde solution consiste à résoudre le problème (2.61) en rajoutant la transformation entre le repère de base et le repère à suivre dans la liste des inconnues. Une troisième solution, valable pour des mouvements restreints du repère à suivre consiste à placer une mire additionnelle fixe par rapport à la base, qui servira à mesurer le déplacement du repère à suivre. Enfin, une quatrième solution, tirant parti de la richesse de l'information fournie par une image, consiste à calculer le mouvement relatif de la caméra par rapport au fond de la scène (fixe par rapport à la base du robot), pour mesurer le mouvement du repère à suivre par rapport à la base soit directement (cas déporté avec caméra mobile) soit indirectement (cas embarqué avec objet mobile) en combinant la pose relative du repère à suivre par rapport à la caméra embarquée et le mouvement de la caméra embarquée par rapport au fond.

2.5 Identification

Dans ce paragraphe, après en avoir traité le premier et troisième volet, nous allons aborder le deuxième volet du triptyque « modélisation, identification et commande » dans le cas des robots parallèles.

Tout d'abord, un mot sur les raisons de ce désordre. En effet, dans l'approche traditionnelle suivie dans ce chapitre, si l'ordre habituel est l'ordre chronologique de mise en œuvre pratique des trois étapes, l'ordre suivi dans ce chapitre est à notre sens l'ordre logique principal de développement mathématique. Ainsi, avant de penser à écrire la moindre loi de commande, il faut disposer d'un modèle du robot (ou du procédé de manière plus générale). De même, tant que la loi de commande n'est pas complètement définie, la liste des paramètres à identifier n'est pas fixée et donc les algorithmes peuvent évoluer.

Les lois de commande que nous avons présentées ou proposées sont définies sur la base de la topologie du robot mais ne font aucune hypothèse quant à ses dimensions. En revanche, la mise en œuvre pratique de ces lois de commande requiert la connaissance, plus ou moins précise selon les lois, de ces dimensions.

Si les dimensions des corps physiques présents dans le mécanisme peuvent être obtenues par la CAO, le résultat *dimensionnel* de l'assemblage, surtout dans le cas des robots parallèles, et les positions des capteurs (articulaires, de vision) par rapport au mécanisme sont plus difficiles à prévoir et à mesurer. De plus, comme il

est impensable d'utiliser pour la commande un modèle exhaustif de tous les phénomènes physiques présents dans le mécanisme, les modèles ne sont qu'une vue partielle (la plus complète possible pour un coût raisonnable, néanmoins) du robot réel. Par conséquent, les paramètres intervenant dans les modèles de commande, n'ont pas forcément pour valeur celles pouvant être directement mesurées sur le mécanisme. Les différences numériques compensent ainsi parfois les approximations nécessaires du modèle. Il est donc préférable, au final, d'avoir recours aux techniques d'identification, c'est-à-dire d'estimer numériquement, par un algorithme adéquat, les paramètres du modèle à partir de mesures décrivant le comportement global du robot plutôt que de mesures directes sur les éléments physiques de ce dernier.

L'identification de modèles géométriques (ou étalonnage) se décompose, comme tout problème d'identification, en 4 étapes principales [Joh93, Lju99] :

1. Modélisation

Cette étape a déjà été en partie traitée plus haut. Néanmoins, cette phase de modélisation contient également le choix du type et de la complexité du modèle en fonction de l'application visée. Cette réflexion doit être alimentée, dans notre cas, par le type de commande choisie (articulaire, cartésienne, asservissement visuel) et les différents modèles géométriques disponibles.

2. Expérimentation

L'identification, pour servir à quelque chose, doit nécessairement se traduire par une ultime application expérimentale sur un vrai robot. Or, cette application expérimentale n'est pas toujours aisée. Une des forces de la méthode proposée ci-dessous est justement de simplifier la mise en œuvre expérimentale, ce qui nous a permis d'appliquer la méthode sur divers types de robots.

3. Estimation des paramètres

Cette étape consiste à trouver l'algorithme permettant la meilleure estimation numérique des paramètres. Pour aboutir à une solution valable, il faut non seulement faire appel au génie mathématique pour savoir comment exploiter les modèles au mieux, mais également garder à l'esprit des préoccupations numériques, qui font le succès ou l'échec des solutions mathématiques. En particulier, le choix de données suffisamment riches (on parle d'excitation suffisante du système [SGT⁺97]) pour fournir une solution numérique précise est fondamentale. Nous plaçons ce point dans l'estimation des paramètres plutôt que dans la partie expérimentale, car la complexité d'un mécanisme parallèle rend difficile un choix empirique. Nous avons donc proposé une méthode formelle pour choisir ces données dans le cas de l'identification géométrique de robots parallèles, prenant en compte la précision du capteur de vision.

4. Validation

Cette dernière étape est fondamentale. Elle consiste à s'assurer de la pertinence des valeurs obtenues pour les paramètres, par des données indépendantes (au

sens probabiliste) de celles utilisées pour l'estimation des paramètres. Notre souci a été, connaissant le scepticisme toujours tenace envers la métrologie par vision, de proposer des validations par des moyens métrologiques autres que la vision, voire d'aller jusqu'à la validation par la commande, juge suprême.

2.5.1 Besoins d'identification pour les différentes commandes

La commande articulaire, sans prise en compte des contraintes cinématiques et avec apprentissage de la consigne articulaire, ne nécessite aucun modèle. Elle peut donc être mise en œuvre sans passer par une phase préalable d'identification des paramètres.

La commande articulaire, vue comme une commande référencée capteur que nous avons proposée et qui prend en compte les contraintes cinématiques, fait appel au modèle cinématique inverse. Ce dernier dépendant de la géométrie du robot, il est nécessaire de connaître la valeur des paramètres. Néanmoins, la régulation se faisant dans un espace capteurs, une précision toute relative est suffisante (*cf.* condition de positivité). Les valeurs CAO du robot peuvent donc suffire. Attention toutefois à déterminer expérimentalement la conversion entre valeur articulaire au sens du modèle et la valeur effectivement délivrée par le capteur : changement de signe éventuel, facteur d'échelle, décalage du zéro. En conclusion, cette commande peut éventuellement être mise en œuvre sans passer par une phase préalable d'identification des paramètres, mais cette dernière peut s'avérer nécessaire pour des suivis de trajectoire articulaire de haute précision.

Dans les deux cas qui précèdent, si la consigne n'est plus seulement déterminée dans l'espace articulaire mais dans l'espace cartésien, alors l'identification devient indispensable et avec de fortes contraintes de précision, puisqu'il faut que le modèle géométrique inverse « colle » au mieux à la géométrie réelle du robot afin de faire une conversion propre de la consigne.

La commande cartésienne, qui est référencée modèle, est la commande qui requiert l'identification la plus précise. En effet, cette commande doit résoudre à chaque itération le problème géométrique direct afin de faire la régulation dans un espace reconstruit et non dans un espace capteur. Pour ne pas ajouter à la difficulté numérique d'obtenir une solution qui ne soit pas trop biaisée au problème géométrique direct en présence de bruits de mesure, il est indispensable d'éviter que de surcroît les paramètres du modèle soient biaisés eux aussi. Il faut donc estimer avec la plus grande précision tous les paramètres décrivant la géométrie réelle du robot (y compris la conversion entre variables articulaires et valeurs délivrées par les capteurs articulaires).

Enfin, la commande référencée capteurs (y compris l'asservissement visuel) ne nécessite pas une précision extrême des modèles, puisqu'ils n'interviennent pas au niveau géométrique. Il suffit d'assurer la condition de positivité. Par exemple, si le

capteur utilisé est un capteur extéroceptif, quel qu'il soit, il faut rajouter dans la loi de commande des *paramètres externes* reliant le capteur et sa cible au robot. Notons que si ce couple capteur/cible paraît évident dans le cas de la vision (une caméra, une mire de taille non négligeable), il est également à considérer dans des solutions plus industrielles : suiveur laser + coin de cube rétroréfléchissant, machine à mesurer tridimensionnelle + liaison mécanique, système à câbles + attache sur l'organe terminal.

2.5.2 Identification des robots parallèles

Afin d'identifier les paramètres géométriques, il faut se donner un critère d'erreur permettant de quantifier l'inadéquation entre des données expérimentales et leurs valeurs obtenues par modèles. De la robotique sérielle est ainsi venu un critère élaboré à partir du modèle géométrique direct, qu'il faut minimiser en agissant sur les paramètres géométriques, à poses et variables articulaires fixées [MWZ93, Vis96, LD97] :

$$\min_{\xi_{geom}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{config}} \|X_i - G_D(\mathbf{q}_i, \xi_{geom})\|^2 \quad (2.62)$$

où, pour chaque configuration de mesure i , l'enregistrement simultané de la pose X_i et des variables articulaires \mathbf{q}_i assure la cohérence des données.

Cette méthode est très robuste numériquement lorsqu'elle est appliquée à un robot sériel. De plus, elle s'adapte à la mesure disponible de la pose [BK99, OSTU00, TAI⁺02, IIK⁺00]. En effet, si le seul moyen de mesure extéroceptif est un capteur de position (dispositif à 3 câbles, par exemple), la méthode s'applique en ne conservant que la partie translationnelle du modèle géométrique direct. En pratique, il faut ajouter aux paramètres géométriques des paramètres externes décrivant le positionnement des deux éléments du dispositif de mesure (capteur, objet cible) relativement à la base et l'organe terminal du robot, soit avec les notations utilisées pour l'asservissement visuel 3D pose d'un robot parallèle :

$$\min_{\xi_{geom}, \xi_{ext}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{config}} \|{}^f\mathbf{T}_m^i - {}^f\mathbf{T}_b {}^b\mathbf{T}_e(\mathbf{q}_i, \xi_{geom}) {}^e\mathbf{T}_m\|^2 \quad (2.63)$$

où ξ_{ext} contient le paramétrage minimal associé à l'ajout des transformations ${}^f\mathbf{T}_b$ et ${}^e\mathbf{T}_m$ et où le modèle géométrique direct a été exprimé comme fournissant la pose ${}^b\mathbf{T}_e$.

En l'absence de dispositif de mesure extéroceptif, il est toujours possible d'imposer des contraintes mécaniques à l'organe terminal pour imposer des poses plutôt que de les mesurer [KD99]. Ceci dit, la mise en œuvre de ces contraintes est fastidieuse. De plus, les résultats numériques associés ne sont pas plus précis que ceux obtenus

par la méthode classique basée sur le modèle géométrique direct et les mesures extéroceptives [BK01]. En effet, elles engendrent une réduction de l'espace de travail. Or, il est reconnu que la qualité de l'identification dépend de l'étendue de l'espace de travail parcouru lors de l'acquisition de données. De plus, il existe désormais sur le marché de nombreuses solutions industrielles pour la mesure extéroceptives et les constructeurs de robot utilisent donc de préférence la méthode classique, voire même parfois la vision (si ! si !).

Toujours est-il que si la méthode classique est la plus efficace numériquement en robotique sérielle, elle n'est pas adaptée au cas parallèle. En effet, elle nécessite à chaque itération de l'algorithme de descente de résoudre le problème géométrique direct (encore lui !). C'est donc *a priori* une méthode gourmande en temps de calcul, mais de surcroît, Daney [Dan99] a montré qu'elle pouvait aboutir à des instabilités numériques.

Aussi, en utilisant la dualité entre robot sériel et robot parallèle, est-il préférable, d'un point de vue mathématique de résoudre le problème suivant [ZMY95, ZYM98b] élaboré à partir du modèle géométrique inverse :

$$\min_{\xi_{geom}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{config}} \|\mathbf{q}_i - G_I(\mathbf{X}_i, \xi_{geom})\|^2 \quad (2.64)$$

Cette méthode s'avère très stable numériquement [Vis96, BK01], mais nécessite la mesure complète de la pose avec une forte précision, ce qui, associé au fait que les robots parallèles n'ont pas encore conquis une grande part de marché, en a fortement restreint l'exploitation expérimentale.

On a donc vu naître des méthodes tentant de contourner le problème de la mesure de pose, notamment en imposant des contraintes sur les jambes [KM97, KB99, Dan99] ou sur l'organe terminal [RR01]. Néanmoins, ces méthodes nous semblent moins recommandables, car elles réduisent l'espace de travail.

Mentionnons également ici, par souci de complétude, la classe de méthodes, dite d'auto-étalonnage, qui consistent à ajouter des capteurs articulaires supplémentaires dans les liaisons passives. Cependant, à notre sens, cette classe relève plus de l'approche intégrée, traitée au prochain chapitre, que de l'approche classique.

Alternativement à l'utilisation du modèle géométrique inverse, on peut exploiter le modèle géométrique implicite [WHA95a] :

$$\min_{\xi_{geom}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{config}} \|G_\phi(\mathbf{X}_i, \mathbf{q}_i, \xi_{geom})\|^2 \quad (2.65)$$

avec les mêmes contraintes de précision des mesures de poses.

En pratique, la représentation de \mathbf{X} qui figure dans les modèles inverse ou implicite est tirée de la transformation base/organe terminal ${}^b\mathbf{T}_e$. Or, un capteur extéroceptif ne mesure qu'une transformation capteur/objet cible ${}^f\mathbf{T}_m$. Nous insistons

donc sur le fait qu'il faut rajouter les paramètres externes dans les problèmes d'optimisation ci-dessus :

$$\min_{\xi_{geom}, \xi_{ext}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{config}} \|\mathbf{q}_i - G_I({}^b\mathbf{T}_f^f \mathbf{T}_m^i {}^m\mathbf{T}_e, \xi_{geom})\|^2 \quad (2.66)$$

$$\min_{\xi_{geom}, \xi_{ext}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{config}} \|G_\phi({}^b\mathbf{T}_f^f \mathbf{T}_m^i {}^m\mathbf{T}_e, \mathbf{q}_i, \xi_{geom})\|^2 \quad (2.67)$$

Remarque 2 (Du double intérêt d'un capteur extéroceptif)

Ainsi, que l'on utilise ou non un capteur extéroceptif lors de la commande, il en faut un pour l'identification. Autant donc le garder pour la commande, d'autant plus que nous avons vu qu'un tel capteur simplifiait la commande !

Que ce soit en exploitant le modèle géométrique inverse ou le modèle géométrique implicite, il faut disposer de mesures précises de la pose et, si possible, à moindre coût. Si les théodolites et autres suiveurs laser 3D répondent au besoin de précision, leur coût est très élevé. Nous ne les recommandons donc que pour les applications de très haute précision.

En effet, en alternative, les systèmes de vision industriels permettent un gain financier. La perte de précision par rapport aux systèmes précédents est en général limitée par l'utilisation de têtes stéréoscopiques régulées en température et l'observation de mires dédiées. Les calculs de pose sous-jacents à ces systèmes étant le plus souvent très classiques, les tolérances de fabrication des mires dédiées doivent être très serrées. Enfin, la mise en œuvre peut être allongée si la mire prévue est incompatible avec la cinématique du robot (collision avec les jambes).

Nous avons donc proposé une méthode permettant de simplifier la réalisation pratique de l'identification [RI7]. Elle utilise pour tout matériel un ordinateur portable, une simple caméra vidéo, une optique à focale courte (3-4 mm), quelques centilitres de peinture noire, une poignée de pastilles rétro-réfléchissantes, et, éventuellement, une petite plaque rigide et de quoi la fixer sur l'organe terminal du robot. Coût : l'équivalent d'une participation à ICRA... Et pourtant, la précision obtenue reste très bonne [RI4].

La thèse de Pierre Renaud [Ren03] fournit de nombreux résultats expérimentaux de cette méthode appliquée aussi bien au robot H4 [CI9], au robot Orthoglide [CI10] qu'au robot I4L [CI13], dont nous ne conserverons ici, par un souci de concision, que les deux suivants :

- l'identification semble donner de meilleurs résultats lorsque l'on utilise un modèle possédant un nombre réduit de paramètres car basé sur les hypothèses de régularité utilisées lors de la conception du robot (p. ex. jambes de longueurs égales) que lorsque l'on utilise un modèle plus complexe, considérant

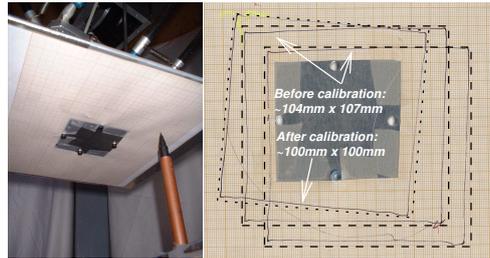


FIG. 2.14 – Validation par la commande des paramètres du H4 identifiés par vision

que les hypothèses de régularité ne peuvent être assurées lors de la réalisation mécanique du robot ;

- la commande articulaire avec consigne cartésienne du robot H4 utilisant les paramètres identifiés par vision atteint une répétabilité de l'ordre de la répétabilité mécanique, soit un ordre de grandeur de mieux que ce qui peut être atteint avec les paramètres CAO (Figure 2.14).

Le secret de la recette² tient tout simplement à deux faits. Le premier est que l'algorithmie sous-jacente au calcul de pose est des plus récentes (ajustement de faisceaux et rejet des données aberrantes) avec une détection de l'ordre du centième de pixel des points dans les images. Le second est qu'en plus des images collectées pour l'identification géométrique, nous prenons dans la foulée des images pour étalonner le système caméra/mire. Ainsi, il n'est pas nécessaire de réguler la caméra en température (le temps d'acquisition des données est faible comparé aux variations thermiques), ni de fabriquer de mire coûteuse (sa géométrie précise est reconstruite au lieu d'être fabriquée), ni encore d'utiliser un système stéréoscopique (la courte focale associée à la détection ultra-précise dans l'image permettant de bien discerner les petits mouvements dans l'image).

Remarque 3 (Analogie commande/identification géométrique)

Les méthodes d'identification minimisant un critère d'erreur entre poses et variables articulaires mesurées par algorithme de descente peuvent être vues comme une commande virtuelle avec actionnement virtuel des paramètres géométriques.

2.5.3 Quelques aspects numériques

La précision effective atteinte dans la minimisation des problèmes (2.66) et (2.67) tient à quatre choses :

- l'identifiabilité des paramètres ;
- la qualité des mesures articulaires et de poses, dont nous avons déjà parlé ;

²Recette ? Vous avez dit recettes ? [And99]

- la qualité de l'information contenue dans le jeu de données accumulées (problème de l'excitation suffisante);
- l'algorithmie numérique mise en œuvre.

Analyse numérique appliquée

Afin d'améliorer l'algorithmie numérique, un premier moyen consiste à fouiller et décrypter la jungle des méthodes d'optimisation numériques, qui reposent quasiment toutes sur de l'analyse en variables continues. Or, où trouver des variables continues dans un ordinateur ? Afin de contourner cette difficulté, de nouvelles arithmétiques sont envisagées : arithmétique probabiliste [GR03] ou arithmétique par intervalles [JKDW01], par exemple.

L'arithmétique par intervalles est en l'occurrence bien adaptée au problème de l'identification [DPN04]. Notre interprétation de ces travaux est qu'ils vont dans le sens de la notion de certification des performances d'un robot. En effet, l'application de l'analyse par intervalles à l'identification correspond à trouver, en fonction d'un intervalle connu dans lequel se trouvent les données expérimentales, un intervalle dans lequel se trouvent à coup sûr les paramètres géométriques.

On ne cherche donc pas à trouver la meilleure solution, ce qui est illusoire puisque la solution numérique n'est en fait que la réalisation d'une variable aléatoire formée des variables aléatoires, éventuellement modélisables, associées aux données, de l'algorithme déterministe de résolution et des variables aléatoires, difficiles voire impossibles à modéliser, associées aux erreurs d'arrondi et autres avatars de la représentation d'un double par un mot binaire. Au mieux, en répétant suffisamment souvent la procédure expérimental d'identification, on obtiendra une moyenne et un écart-type *estimés* des paramètres géométriques, dont on ne saura que faire à moins de faire l'hypothèse abusive de la normalité de leur distribution.

En revanche, travailler avec des intervalles permet de s'affranchir de trouver une distribution probabiliste associées aux données et, puisque rien n'impose une relation entre les bornes de l'intervalle et la moyenne et autres moments des données, de réfléchir en termes de « pire cas ». D'ailleurs, cette notion de pire cas est également incluse dans l'implémentation pratique de l'arithmétique par intervalles puisque les intervalles résultats d'une opération sur deux intervalles sont toujours surestimés.

Ainsi donc, le résultat que fournira un algorithme d'identification par intervalles sera un encadrement au pire cas des paramètres géométriques. On aura donc une estimation garantie de ces paramètres, et donc de la précision du robot.

Nous avons participé à la validation expérimentale de ces travaux [WI2, RI9] pour l'identification géométrique de la plateforme de Gough-Stewart par la méthode du modèle géométrique inverse. Pour cela, nous avons besoin d'estimer les intervalles dans lesquels se trouvaient les mesures visuelles. Aussi avons-nous mené des campagnes répétitives d'acquisition de données. Nous avons ainsi accumulé près de

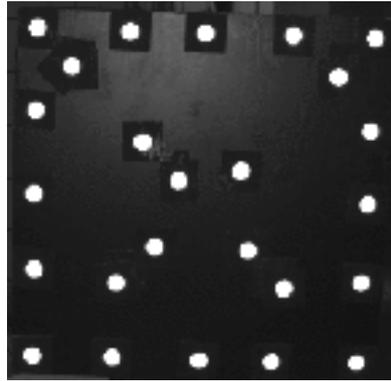


FIG. 2.15 – Mire aux invariants

15000 images. Cette quantité d'images rendait impossible une détection manuelle, suffisante pour une identification géométrique classique où une trentaine d'images sont prises. Afin d'automatiser la procédure d'extraction, nous avons donc exploité la notion d'invariants projectifs afin de « signer » la mire observée par la caméra. Ainsi, nous avons placé sur les deux diagonales de la mire des alignements de points (une droite reste une droite sous projection perspective) dont les 4 points à chaque extrémité ont des birapports les plus différents possibles (Figure 2.15).

Optimisation des poses

Quelque soit l'arithmétique mise en œuvre, il faut s'assurer d'exciter suffisamment le système numérique à résoudre [SGT⁺97], afin d'obtenir des résultats numériques précis pour l'identification, de quelque type soit-elle. Dans le cas de l'identification géométrique, il s'avère préférable de privilégier la qualité à la quantité. En effet, un rapport empirique de 3 entre le nombre d'équations de mesure et le nombre d'inconnues du problème est considéré comme un bon compromis entre le coût (temps d'acquisition et de traitement) et la précision obtenue, à condition toutefois que les données accumulées soient suffisamment distinctes les unes des autres. Toute la difficulté réside en fait sur la définition d'une mesure de la richesse des données.

Un choix empirique consiste à parcourir le plus largement possible l'espace de travail, en se plaçant en ses limites. Reste en suspens la question de savoir s'il vaut mieux atteindre les limites de l'espace de travail articulaire ou celle de l'espace de travail cartésien. De plus, les limites de l'espace de travail étant continues, le choix des configurations du robot utilisables selon ce critère reste grand.

Sur la base d'un nombre donné de configurations à parcourir, on trouve dans la littérature plusieurs critères d'optimisation permettant de choisir de manière numérique les configurations les plus à même d'aboutir à un bon résultat d'identification.

Ces critères sont tous forgés sur l'hypothèse de l'utilisation de l'algorithme de Gauss-Newton pour la résolution du problème de minimisation aux moindres carrés d'une fonction non linéaire f qu'est l'identification géométrique. En effet, cet algorithme résoud, à chaque itération, un système linéaire, approximation au premier ordre de la fonction de coût f , de la forme :

$$\Delta f(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}^k) = \frac{\partial f}{\partial \xi_{geom}}(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}^k) \Delta \xi_{geom} \quad (2.68)$$

Pour que la solution de ce système linéaire soit « propre » au sens numérique du terme, il faut que la matrice $\frac{\partial f}{\partial \xi_{geom}}(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \xi_{geom}^k)$, appelée *régresseur*, soit numériquement bien conditionnée.

Les critères de choix des poses cherchent donc à déterminer les configurations du robot qui donnent le meilleur conditionnement possible du régresseur, *estimé avec les valeurs a priori des paramètres géométriques* ξ_{geom}^0 . Ainsi, peut-on choisir pour critère le nombre de conditionnement de la matrice [DP90, ZWR94, Dan02] :

$$C_1 = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (2.69)$$

qui est plus pertinent numériquement que ceux basé sur une simple condition d'inversibilité (déterminant [BM91] ou plus faible valeur singulière [NH96b]).

Cependant, une matrice aux valeurs singulières toutes très faibles peut avoir un bon nombre de conditionnement sans pourtant mener à une solution fiable numériquement. Aussi, a-t-il été proposé [NH96b] un critère de la forme :

$$C_2 = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}^2} \quad (2.70)$$

qui maximise le conditionnement de la matrice ainsi que l'ensemble des valeurs singulières.

Néanmoins, ces critères ne tiennent pas vraiment compte des incertitudes associées aux capteurs, aussi bien proprioceptifs qu'extéroceptifs. Aussi avons-nous proposé [CI10] un nouveau critère de choix des configurations basé sur l'analyse de l'effet des bruits de mesure sur le critère de minimisation (2.66) entre les valeurs articulaires mesurées et leurs estimations obtenues à partir des mesures extéroceptives et du modèle géométrique inverse.

En effet, en l'absence de bruit de mesure, ce critère consiste à minimiser, pour chaque configuration i , l'erreur :

$$\epsilon_i = \mathbf{q}_i - G_I({}^b\mathbf{T}_f {}^f\mathbf{T}_m^i {}^m\mathbf{T}_e, \xi_{geom}) \quad (2.71)$$

Une approximation au premier ordre du second membre de cette expression donne :

$$\epsilon_i = \bar{\mathbf{q}}_i + \delta \mathbf{q}_i - G_I({}^b\mathbf{T}_f \overline{{}^f\mathbf{T}_m^i} {}^m\mathbf{T}_e, \xi_{geom}) - C_I({}^b\mathbf{T}_f \overline{{}^f\mathbf{T}_m^i} {}^m\mathbf{T}_e, \xi_{geom}) \delta \mathbf{X}_i \quad (2.72)$$

où la notation $\bar{\cdot}$ désigne les valeurs mesurées, $\delta \mathbf{q}_i$ est l'écart entre les variables articulaires mesurées et réelles, $\delta \mathbf{X}_i$ est l'écart, homogène à un torseur cinématique, entre la pose mesurée par le capteur extéroceptif et la pose réelle. L'approximation au premier ordre du critère d'optimisation se réécrit donc sous la forme d'une erreur articulaire mesurée $\bar{\boldsymbol{\epsilon}}_i$ et de son écart $\delta \boldsymbol{\epsilon}_i$ à l'erreur articulaire réelle :

$$\boldsymbol{\epsilon}_i = \underbrace{\bar{\mathbf{q}}_i - G_I({}^b\mathbf{T}_f^f \overline{{}^i\mathbf{T}_m^m} {}^m\mathbf{T}_e, \xi_{geom})}_{\boldsymbol{\epsilon}_i} + \underbrace{\delta \mathbf{q}_i - \mathbf{C}_I({}^b\mathbf{T}_f^f \overline{{}^i\mathbf{T}_m^m} {}^m\mathbf{T}_e, \xi_{geom}) \delta \mathbf{X}_i}_{\delta \boldsymbol{\epsilon}_i} \quad (2.73)$$

Afin que la procédure numérique d'identification soit la moins biaisée possible, il faut que l'erreur articulaire mesurée soit la plus proche possible de l'erreur articulaire réelle et, par conséquent, que leur écart soit minimal. Ainsi, aboutissons-nous au nouveau critère de choix des poses qui complète le critère C_2 par la minimisation de la norme du terme $\delta \boldsymbol{\epsilon}_i$:

$$C_3 = C_2 \|\delta \boldsymbol{\epsilon}\|_{sup} \quad (2.74)$$

dans lequel le terme $\|\delta \boldsymbol{\epsilon}\|_{sup}$ est un majorant des normes de tous les $\delta \boldsymbol{\epsilon}_i$. Nous avons proposé le majorant suivant :

$$\|\delta \boldsymbol{\epsilon}\|_{sup} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\delta \mathbf{q}_{sup} + \left| \mathbf{C}_I({}^b\mathbf{T}_f^f \overline{{}^i\mathbf{T}_m^m} {}^m\mathbf{T}_e, \xi_{geom}) \right| \delta \mathbf{X}_{sup} \right)^2} \quad (2.75)$$

où $\left| \mathbf{C}_I({}^b\mathbf{T}_f^f \overline{{}^i\mathbf{T}_m^m} {}^m\mathbf{T}_e, \xi_{geom}) \right|$ désigne la matrice constituée des valeurs absolues de chaque élément de $\mathbf{C}_I({}^b\mathbf{T}_f^f \overline{{}^i\mathbf{T}_m^m} {}^m\mathbf{T}_e, \xi_{geom})$, $\delta \mathbf{q}_{sup}$ and $\delta \mathbf{X}_{sup}$ désignent soit des bornes supérieures des erreurs de mesure ou des valeurs associées à un intervalle de confiance prédéterminé.

Une conséquence immédiate de ce critère est qu'au voisinage des singularités parallèles le bruit de mesure extéroceptif est atténué (la matrice cinématique inverse possède des valeurs singulières très petites) alors qu'au voisinage des singularités sérielles le bruit de mesure extéroceptif est amplifié (la matrice cinématique inverse possède des valeurs singulières très grandes).

Nous nous proposons, ici, de généraliser encore ce critère, en nous fondant plutôt sur le modèle géométrique implicite, qui fusionne identification géométrique de robots sériels et de robots parallèles en un seul formalisme [WHA95a]. Ainsi, le problème d'optimisation à résoudre (2.67) consiste à minimiser pour chaque configuration i l'erreur suivante :

$$\boldsymbol{\epsilon}'_i = G_\phi({}^b\mathbf{T}_f^f \overline{{}^i\mathbf{T}_m^m} {}^m\mathbf{T}_e, \mathbf{q}_i, \xi_{geom}) \quad (2.76)$$

qui s'approxime au premier ordre par :

$$\begin{aligned} \bar{\boldsymbol{\epsilon}}'_i + \delta \boldsymbol{\epsilon}'_i &= G_\phi({}^b\mathbf{T}_f^f \overline{{}^i\mathbf{T}_m^m} {}^m\mathbf{T}_e, \bar{\mathbf{q}}_i, \xi_{geom}) \\ &+ \mathbf{C}_A({}^b\mathbf{T}_f^f \overline{{}^i\mathbf{T}_m^m} {}^m\mathbf{T}_e, \bar{\mathbf{q}}_i, \xi_{geom}) \delta \mathbf{q}_i \\ &+ \mathbf{C}_C({}^b\mathbf{T}_f^f \overline{{}^i\mathbf{T}_m^m} {}^m\mathbf{T}_e, \bar{\mathbf{q}}_i, \xi_{geom}) \delta \mathbf{X}_i \end{aligned} \quad (2.77)$$

d'où le critère généralisé, valable pour les robots sériels et parallèles :

$$C_4 = C_2 \|\delta \epsilon'\|_{sup} \quad (2.78)$$

où

$$\|\delta \epsilon'\|_{sup} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\begin{array}{c} \left| \mathbf{C}_A({}^b\mathbf{T}_f \overline{\mathbf{J}} \mathbf{T}_m^i \mathbf{m}\mathbf{T}_e, \overline{\mathbf{q}}_i, \xi_{geom}) \right| \delta \mathbf{q}_{sup} \\ + \left| \mathbf{C}_C({}^b\mathbf{T}_f \overline{\mathbf{J}} \mathbf{T}_m^i \mathbf{m}\mathbf{T}_e, \overline{\mathbf{q}}_i, \xi_{geom}) \right| \delta \mathbf{X}_{sup} \end{array} \right)^2} \quad (2.79)$$

L'interprétation de ce critère est que les bruits de mesure sont atténués au voisinage des singularités cartésiennes et articulaires.

Identifiabilité

Afin de ne pas perturber la procédure itérative d'optimisation mise en œuvre pour l'identification, il faut s'assurer qu'il n'existe pas, au sein du vecteur des paramètres géométriques, des paramètres inutiles ou des paramètres couplés. Aux premiers sont associés des colonnes nulles du régresseur. Aux seconds sont associés des relations de dépendance linéaire entre colonnes du régresseur. Dans les deux cas, cela cause des pertes de rang du régresseur, qui sont nuisibles à la résolution, à chaque itération, du problème linéarisé. Nous avons montré que [RI7], lors d'une identification géométrique par capteur extéroceptif, pouvaient s'ajouter aux pertes de rang structurelles [KGE91], dues à une modélisation non minimale de la cinématique du robot, des pertes de rang dues à des couplages entre les paramètres géométriques du robot et les paramètres externes décrivant la pose relative du dispositif de mesure par rapport au robot.

Notons que l'identifiabilité effective d'un paramètre n'est pas toujours simple à définir en pratique. En effet, les conditions d'identifiabilité se ramènent à trouver des colonnes identiquement nulles, alors que le zéro numérique n'existe pas. Cela peut expliquer que l'identification d'un modèle possédant un nombre réduit de paramètres et basé sur les hypothèses de régularité utilisées lors de la conception du robot soit plus précise que l'identification d'un modèle possédant un nombre plus important de paramètres et relâchant les hypothèses de régularité. En effet, les imperfections de réalisation mécanique du robot rendent caduques les hypothèses de régularité, ce qui, en théorie, devrait empêcher les couplages entre les paramètres du modèle plus complexe. Néanmoins, ces hypothèses ne sont pas loin d'être valides, ce qui fait que numériquement ces paramètres ne sont pas loin d'être couplés, rendant leur identification séparée difficile.

Identification récurrente

Un choix approprié des configurations permet d'obtenir de très bons résultats numériques. Néanmoins, ce choix de configurations se fait à partir des valeurs *a priori*

des paramètres géométriques. Il consiste donc à choisir les configurations permettant la meilleure identification d'un robot défini par ces paramètres *a priori*. Or, le robot réel diffère de ce robot *a priori*. Nous pensons donc qu'il serait souhaitable, après l'obtention de résultats d'identification et leur validation, de recommencer toute la procédure d'identification (depuis la modélisation jusqu'à la validation) pour prendre en compte la connaissance améliorée du robot. En particulier, lors de la première identification, l'acquisition des données est faite en fonction d'une complexité du modèle le plus souvent choisie empiriquement. Il peut donc être pertinent après avoir identifié plusieurs modèles sur ces données, d'acquies de nouvelles données en fonction du modèle qui semble le plus réaliste.

Ainsi donc, l'identification devient une procédure itérative qu'il peut être nécessaire de reproduire jusqu'à atteindre la meilleure précision disponible.

2.6 Conclusion et perspectives intermédiaires

Dans ce chapitre, nous avons, dans un premier temps, revisité la modélisation des robots manipulateurs dans une tentative de formalisation systématique. En effet, cette relecture s'est faite avec une vision d'ensemble non restreinte à un seul domaine (cinématique, commande ou vision) ni à un seul type d'application (robot sériel ou parallèle). Ainsi, nous avons rappelé que l'usage du terme « Jacobienne » est impropre et nous y avons substitué le terme « matrice cinématique ». Nous avons vu également que matrice cinématique et matrice d'interaction pouvait parfois être synonymes. Enfin, si l'on ne devait retenir qu'un enseignement de cette partie dédiée à la modélisation, ce serait que l'état d'un mécanisme parallèle est la pose de son organe terminal et non sa configuration articulaire. Cet enseignement est le fondement de toutes les contributions de ce manuscrit et devrait désormais être présent à l'esprit de quiconque s'intéresse aux mécanismes parallèles.

De cet enseignement fondamental, nous avons déduit que la commande articulaire d'un robot parallèle n'est autre qu'une commande référencée capteurs, que nous avons reformulée comme telle. A l'inverse, nous avons montré que l'asservissement visuel 3D pose n'était, en définitive, qu'une simple commande par retour d'état non linéaire. Ainsi, la dualité cinématique entre mécanisme sériel et mécanisme parallèle se retrouve partiellement au niveau de la commande, puisque l'on peut quasiment passer du schéma de commande articulaire d'un robot sériel à celui d'asservissement visuel 3D pose par remplacement des variables articulaires par les variables de pose. La seule différence est la présence de la matrice cinématique inverse dans le cas parallèle. En fait, cette faille dans la dualité vient du fait que si l'espace de commande (et de mesure) est l'espace d'état, l'espace d'actionnement ne l'est que dans le cas sériel.

Par ailleurs, nous avons montré que les capteurs articulaires ne sont pas néces-

saires (et sont à peine suffisants) pour la commande de robots parallèles. Ainsi, perception et actionnement peuvent être complètement dissociés. En effet, cette dissociation n'est qu'incomplète dans la commande référencée capteurs de robots sériels puisque la matrice cinématique directe du robot est renseignée par les mesures articulaires. Une dissociation complète n'a été réalisée qu'exceptionnellement dans le passé pour des robots sériels [MCSP02, SK87, SK88] mais cela n'était pas aussi évident que pour un robot parallèle. Cette découverte aura, espérons-le, des conséquences simplificatrices sur la conception mécatronique de robots parallèles. En effet, tout est désormais sur la table pour réaliser un robot parallèle industriel commandé par vision.

En résumé, l'asservissement visuel 3D pose d'un robot parallèle est le schéma de commande le plus simple pour réaliser une tâche robotique définie dans l'espace cartésien, qui est le besoin le plus fréquent. Nous en concluons que le couplage entre vision et robot parallèle semble le mieux adapté à ce type de tâche. Nous en aurons confirmation totale plus loin. Enfin, la robotique réclamant son lot d'expérimentation, nous avons validé expérimentalement l'asservissement visuel 3D pose.

Dans un troisième temps, nous nous sommes penchés sur le problème de l'identification géométrique. Si nous n'avons pas apporté de contribution aussi novatrice que dans le cas de la commande, nous avons rajouté quelques touches de couleur nouvelles au tableau d'ensemble : nouveau critère d'optimisation du choix des poses prenant en compte la précision de la mesure, première réalisation connue de l'identification géométrique de robots parallèles par vision, soutien au développement de méthodes certifiées.

Nous tenons à souligner l'aspect pluridisciplinaire de ces contributions puisque elles sont relatives aussi bien à l'automatique non linéaire qu'à la vision par ordinateur, en passant par la cinématique ou l'asservissement visuel et débouchant sur une ouverture inattendue sur la conception méca(tro)nique.

Comme suggéré dans l'introduction de ce chapitre, ces contributions ne sont pour autant qu'un point de départ pour des résultats plus innovants. Les premiers consisteront à porter ces résultats dans le cas dynamique, ce qui fera l'objet d'un chapitre ultérieur. Les seconds consisteront à se rapprocher encore plus de la cinématique pour pouvoir pallier d'éventuelles impossibilités d'observation de l'organe terminal, ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

En attendant, il reste néanmoins encore un certain nombre de perspectives ouvertes, qui sont plus ponctuelles. La première consiste à tirer parti des capteurs articulaires, généralement de bonne précision, pour améliorer le comportement d'une commande 3D pose. En effet, puisque les capteurs (associés au mécanisme identifié) et la vision fournissent deux mesures d'une même pose, nous pouvons envisager d'implanter un calcul de la pose de l'organe terminal minimisant non seulement l'erreur dans l'image mais également dans l'espace articulaire. La question en suspens est de savoir si la précision métrologique des capteurs articulaires ne sera pas diluée

dans les imprécisions de modèle. Une telle méthode posera également des problèmes numériques puisqu'elle relève de l'optimisation multi-critère où les critères ne sont pas homogènes en unités.

Dans le même ordre d'idée, nous pouvons également prévoir une méthode d'identification globale de l'ensemble robot+caméra+mire, afin d'éviter des propagations d'incertitudes du fait des deux identifications successives (étalonnage caméra+mire puis identification géométrique). Plusieurs difficultés seront forcément sur le chemin : la taille de l'espace des paramètres, l'initialisation de la méthode et la qualité de l'excitation du système. Sans aller jusqu'à l'identification globale de l'ensemble robot+caméra+mire, nous pourrions proposer une méthode d'identification géométrique avec un critère formulé dans l'image, ce qui ne se fera pas aussi simplement que dans le cas sériel et aboutira certainement de nouveau à un problème d'optimisation multi-critère dans un espace de dimension élevée.

Si l'on conçoit un robot sans capteur articulaire commandé par vision, il sera utile de développer une méthode d'identification géométrique par vision sans mesure articulaire.

En ce qui concerne la commande à présent, il est certain que sera développée une méthode pour permettre l'asservissement visuel d'un robot parallèle sur une cible mobile. Cette méthode viendra compléter l'étude proposée plus haut pour estimer en ligne la transformation variable entre la cible mobile et la base, nécessaire au calcul de la matrice cinématique inverse.

On pourra également étudier le comportement des asservissements visuels plus récents (2D 1/2, moments) appliqués aux robots parallèles, lorsque la pose est disponible.

Une perspective quasiment toujours évoquée dès qu'il est question du couplage vision-robotique est d'étendre les résultats proposés plus haut dans le cas monoculaire à un système de vision stéréoscopique, voire multi-oculaire. Nous ne l'oublions donc pas ici.

Enfin, puisque nous avons évoqué l'identification géométrique garantie, nous devons en tirer des perspectives, qui ne sont, pour le coup, pas ponctuelles. En effet, l'identification géométrique certifiée à laquelle nous avons participé se basait sur un calcul en virgule flottante des poses. Nous pourrions donc coupler étalonnage de caméra et calcul de pose garantis [TAR03] et identification géométrique garantie. Nous pourrions enfin, et c'est une autrement plus complexe, étendre l'utilisation de l'analyse numérique garantie à toute la chaîne modélisation, identification et commande.

Still Got ICRA

Texte : Nikå

Inspiration : Buddy Guy, Nisse Hellberg och Peps Persson

Musique, chant, guitare, etc., etc. : Mich'L

ICRA's over
What a relief!
Hard work's over
Gotta get loose

Tired of Big Ears
Went to New York City
Toured the City
Had some beers
Yeah!

Tired of walkin'
Ended up @ Terra Blues
Heard some good blues
Good feelin'
Yeah!

Time to go home
Students & robots waitin'
Much to do in
Puy de Dome
Yeah!

ICRA's over
Not a relief!
Till September
Will have the blues

Chapitre 3

MICMAC intégré

3.1 Introduction

La méthodologie suivie au chapitre précédent est modulaire. Cependant, la somme de modules optimisés est-elle le système optimal ? Aussi dans ce chapitre allons-nous adopter une méthodologie intégrée puisque nous allons, dès la phase de modélisation, anticiper sur la commande et l'instrumentation. En fait, ce chapitre est le résultat d'une véritable démarche mécatronique où les allers-retours furent fréquents entre modélisation et commande, avec des détours par l'identification. C'est d'ailleurs, historiquement, l'identification qui lança cette démarche.

3.2 Méthodologie

La méthodologie suivie dans ce chapitre est fortement influencée par le constat que la cinématique d'un robot parallèle peut être décrite par l'ensemble articulé des droites reliant les articulations successives du mécanisme entre elles et que visuellement ces droites sont directement observables sur le mécanisme.

Ainsi donc, un préalable à la modélisation est que l'observation des éléments cinématiques doit fournir des informations supplémentaires par rapport à une perception du mécanisme réduite à l'observation de son organe terminal et les mesures dans les moteurs. Nous ne nous imposons donc aucune restriction dans la phase de modélisation quant à la connaissance de tel ou tel terme. Cela nous amène à formuler la méthodologie suivante, présentée ici de manière séquentielle par la force de l'écrit mais dont chaque phase interagit avec les autres :

1. Modélisation géométrique et cinématique complète du mécanisme ;

Nous abordons cette phase sans préjugé et de manière la plus générique possible. Ainsi, le modèle géométrique utilisé de préférence sera un modèle implicite. A la différence du modèle implicite vu dans le chapitre précédent, celui-ci sera vectoriel puisqu'il exprimera une contrainte de fermeture de chaîne cinématique de manière vectorielle et non plus scalaire. En effet, le modèle implicite scalaire du chapitre précédent venait d'une restriction initiale concernant la direction du vecteur autour duquel se referme la chaîne cinématique.

2. Commande référencée capteurs ;

On remarque que dans cette phase, nous nous plaçons délibérément dans l'hypothèse que des capteurs vont être utilisés pour la commande. Cette hypothèse n'est en aucun cas restrictive : rappelons-nous que la commande articulaire d'un robot parallèle est une commande référencée capteurs !

Bien entendu, le capteur privilégié sera un capteur de vision, pour la richesse des informations qu'il fournit.

3. Identification référencée capteurs.

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, l'identification n'intervient dans une méthodologie globale qu'en dernier lieu. A cela rappelons les deux raisons : la commande référencée capteurs est en général robuste aux erreurs de modèles et l'identification sert à déterminer les paramètres du modèle utilisé pour la commande.

Néanmoins, dans une approche intégrée, rien ne nous empêche, afin de simplifier l'identification, de modifier la loi de commande ou le modèle de commande.

3.3 Modélisation

La méthodologie de ce chapitre est basée sur l'intuition que les droites, et leur géométrie, permettent une représentation optimale de la cinématique des robots parallèles et de leur perception par vision. De là à imaginer un modèle géométrique (ou cinématique) projectif, il n'y a qu'un pas que nous allons tenter de franchir.

Notons qu'un modèle géométrique projectif a été proposé par Ruf [RH99] dans le cas des robots sériels par l'introduction d'opérateurs associant un mouvement dans l'espace projectif 3D à un mouvement articulaire. Nous chercherons pour notre part à décrire la cinématique directement dans l'image, c'est-à-dire l'espace projectif 2D.

Plutôt que de faire une présentation exhaustive de la géométrie des droites, nous allons en présenter un florilège au fur et à mesure de nos besoins. Ceux-ci commencent par une représentation des droites adaptée à la vision et son exploitation pour la modélisation cinématique.

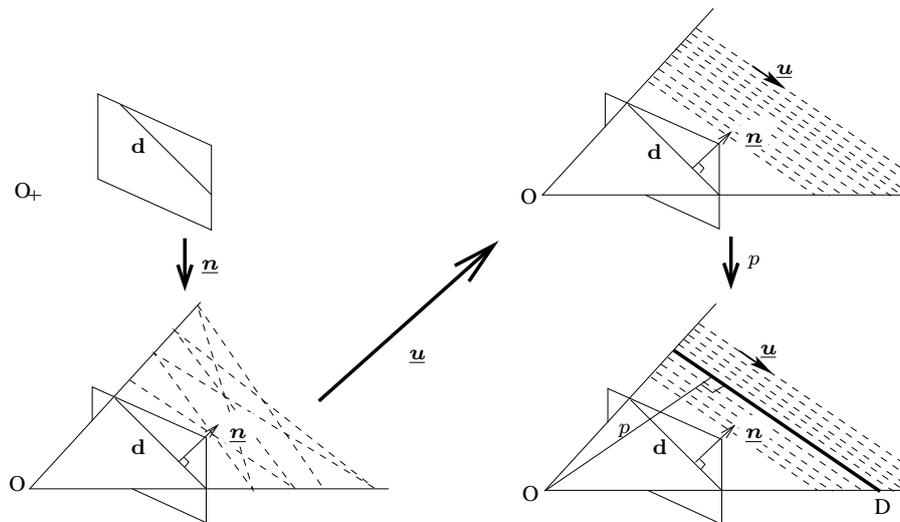


FIG. 3.1 – Interprétation des coordonnées de Plücker binormées d’une droite 3D

3.3.1 Représentation des droites

Dans [RI2], nous avons proposé une représentation des droites dans une optique d’asservissement visuel par rapport à une scène composée de droites fixes les unes par rapport aux autres. Il s’est avéré que cette représentation fonctionne également très bien dans le cadre de l’asservissement visuel de robots parallèles (ensemble de droites en mouvement les unes par rapport aux autres).

Cette représentation est issue des coordonnées de Plücker d’une droite [Plü65, SK52]. Formellement, un couple de vecteurs unitaires orthogonaux $(\underline{u}, \underline{n})$ définit le faisceau des droites situées dans un même plan, de normale \underline{n} et passant par l’origine du repère, et orientées selon la même direction \underline{u} . Le couple $(\underline{u}, \underline{n})$ est appelé coordonnées de Plücker binormées du faisceau de droites. Toutes les droites du faisceau sont donc différenciées par leur profondeur p le long de la direction $\underline{o} = (\underline{u} \wedge \underline{n})$, perpendiculaire à \underline{u} dans le plan défini par \underline{n} . Ainsi, le triplet $(\underline{u}, \underline{n}, p)$ définit entièrement une droite 3D \mathbf{D} (Figure 3.1), et est appelé par extension coordonnées de Plücker binormées de la droite. En effet, les coordonnées de Plücker (appelées également coordonnées de Plücker normées [PPR98a]) de cette même droite \mathbf{D} sont le couple de vecteurs orthogonaux $(\underline{u}, p\underline{n})$ dont seul le premier est unitaire. La composante $p\underline{n}$ des coordonnées de Plücker est appelée le moment de la droite.

Nous précisons, si nécessaire, le repère \mathcal{R}_x dans lequel ces coordonnées sont exprimées par un exposant gauche : $({}^x\underline{u}, {}^x\underline{n}, {}^xp)$.

L’intérêt majeur de dissocier les coordonnées de Plücker d’une droite en 3 composantes est que la composante \underline{n} peut être interprétée à la fois comme une information 3D et comme une information 2D. En effet, cette composante définit le plan 3D (π)

auquel appartient la droite :

$$\pi = \{ {}^c\mathbf{P} = {}^t({}^cX, {}^cY, {}^cZ) \mid ({}^c\mathbf{n} \cdot {}^c\mathbf{P}) = {}^c\mathbf{n}_x {}^cX + {}^c\mathbf{n}_y {}^cY + {}^c\mathbf{n}_z {}^cZ = 0 \} \quad (3.1)$$

De plus, si, comme nous le supposons implicitement, l'origine du repère est le centre de projection, alors le plan (π) est aussi le plan d'interprétation, dont l'intersection avec le plan image fournit la projection de la droite dans l'image :

$$\mathbf{d} = \{ {}^c\mathbf{p} = {}^t({}^cx, {}^cy, 1) \mid ({}^c\mathbf{n} \cdot {}^c\mathbf{p}) = {}^c\mathbf{n}_x {}^cx + {}^c\mathbf{n}_y {}^cy + {}^c\mathbf{n}_z = 0 \} \quad (3.2)$$

Nous obtenons donc les coordonnées ${}^c\mathbf{d}$ de la droite image \mathbf{d} dans le repère image normalisé tout simplement par :

$${}^c\mathbf{d} = {}^c\mathbf{n} \quad (3.3)$$

Un autre intérêt de cette notation est que le triplet $(\mathbf{u}, \mathbf{n}, \mathbf{o})$ forme une base orthonormée.

Le passage des coordonnées normalisées aux coordonnées pixeliques se fait en considérant l'équation de la droite en coordonnées pixeliques :

$$({}^{im}\mathbf{n} \cdot {}^{im}\mathbf{p}) = 0 \quad (3.4)$$

dans laquelle on remplace les coordonnées pixeliques ${}^{im}\mathbf{p}$ du point \mathbf{p} par son expression en fonction de ses coordonnées normalisées ${}^c\mathbf{p}$ et de la matrice \mathbf{K} des paramètres intrinsèques :

$$({}^{im}\mathbf{n} \cdot \mathbf{K} {}^c\mathbf{p}) = 0 \quad (3.5)$$

Par identification avec $({}^c\mathbf{n} \cdot {}^c\mathbf{p}) = 0$ et en conservant une représentation des coordonnées pixeliques de \mathbf{d} par un vecteur unitaire, nous avons donc les changements de coordonnées dans le plan image :

$${}^c\mathbf{n} = \frac{{}^t\mathbf{K} {}^{im}\mathbf{n}}{\| {}^t\mathbf{K} {}^{im}\mathbf{n} \|} \quad (3.6)$$

$${}^{im}\mathbf{n} = \frac{{}^t\mathbf{K}^{-1} {}^c\mathbf{n}}{\| {}^t\mathbf{K}^{-1} {}^c\mathbf{n} \|} \quad (3.7)$$

3.3.2 Cinématique

Une représentation cinématique complète

En pratique, pour la plupart des robots parallèles, le modèle géométrique implicite, dans l'approche modulaire, est obtenu en écrivant une contrainte scalaire de fermeture de chaîne cinématique autour d'un élément cinématique de longueur connue. Le modèle géométrique inverse en est ensuite déduit par manipulation algébrique.

Exemple 1 : Robot Delta

Considérons le robot Delta [Cla91b] représenté schématiquement en Figure 3.2. Son modèle géométrique implicite est obtenu en écrivant, pour chaque jambe i , la contrainte de fermeture de boucle cinématique autour de son avant-bras de longueur L_i :

$$\forall i = 1..3, L_i^2 = \|\mathbf{AB}_i\|^2 \quad (3.8)$$

En faisant intervenir le centre P_j de la liaison actionnée :

$$\forall i = 1..3, \mathbf{AB}_i = \mathbf{AP}_i + \mathbf{PB}_i$$

cette contrainte se développe en le modèle géométrique implicite :

$$\forall i = 1..3, -L_i^2 + \ell_i^2 + \|\mathbf{PB}_i\|^2 + 2\ell_i ((\cos q_i \mathbf{x}_i + \sin q_i \mathbf{y}_i) \cdot \mathbf{PB}_i) = 0 \quad (3.9)$$

où \mathbf{PB}_i dépend de la géométrie de la nacelle, de celle de la base et de leur position relative ${}^b\mathbf{t}_e$ et où \mathbf{x}_i et \mathbf{y}_i sont des directions fixes formant un trièdre orthonormé avec la direction de l'axe \mathbf{z}_i du moteur i .

Ce modèle implicite scalaire est ensuite exprimé en fonction de $t_i = \text{tg}(q_i/2)$:

$$\forall i = 1..3, \underbrace{(-L_i^2 + \ell_i^2 + \|\mathbf{PB}_i\|^2)}_{a({}^b\mathbf{t}_e)} + \underbrace{2\ell_i (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{PB}_i)}_{b({}^b\mathbf{t}_e)} \frac{1 - t_i^2}{1 + t_i^2} + \underbrace{2\ell_i (\mathbf{y}_i \cdot \mathbf{PB}_i)}_{c({}^b\mathbf{t}_e)} \frac{2t_i}{1 + t_i^2} = 0 \quad (3.10)$$

pour obtenir le modèle géométrique inverse :

$$\forall i = 1..3, q_i = 2 \text{atg} \left(\frac{-c({}^b\mathbf{t}_e) \pm \sqrt{c({}^b\mathbf{t}_e)^2 + b({}^b\mathbf{t}_e)^2 - a({}^b\mathbf{t}_e)^2}}{a({}^b\mathbf{t}_e) - b({}^b\mathbf{t}_e)} \right) \quad (3.11)$$

Le choix du signe de la solution ne peut être obtenu qu'en connaissant le montage du robot.

Exemple 2 : Robot Delta linéaire

Considérons à présent la variante du robot Delta [ZDSR96] obtenu en remplaçant les moteurs rotatifs par des moteurs linéaires, représenté schématiquement en Figure 3.3. De la même manière que pour le robot Delta, la contrainte de fermeture de chaîne cinématique est exprimée autour de chaque avant-bras, ce qui aboutit au modèle géométrique implicite :

$$\forall i = 1..3, q_i^2 + 2q_i (\mathbf{z}_i \cdot \mathbf{PB}_i) + \|\mathbf{PB}_i\|^2 - L_i^2 = 0 \quad (3.12)$$

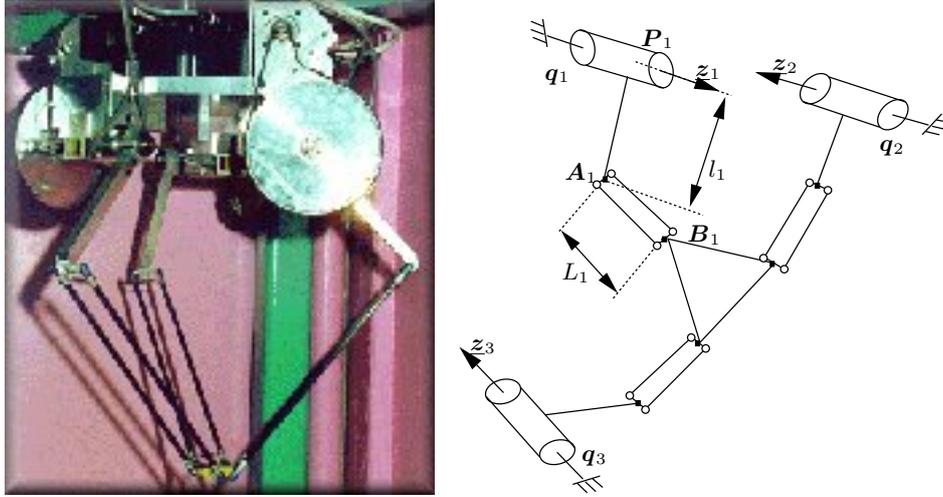


FIG. 3.2 – Représentation schématique du robot Delta

où le point P_i est l'origine du moteur i et PB_i dépend de ${}^b t_e$.

On obtient alors le modèle géométrique inverse :

$$\forall i = 1..3, q_i = -(\underline{z}_i \cdot \underline{PB}_i) \pm \sqrt{(\underline{z}_i \cdot \underline{PB}_i)^2 - \|\underline{PB}_i\|^2 + L_i^2} \quad (3.13)$$

Le signe de la solution est également déterminé à partir du montage du robot.

┌

┐

Exemple 3 : Plateforme de Gough-Stewart

┌

┐

Considérons la plateforme de Gough-Stewart [GW62a, Ste65], avec les notations de la Figure 3.4. Dans ce cas-là également, on obtient, tel Monsieur Jourdain, le modèle géométrique implicite par l'écriture de la fermeture de chaîne cinématique autour de chaque jambe :

$$\forall i = 1..6, q_i^2 = \|\underline{AB}_i\|^2 \quad (3.14)$$

où le point A_i est fixe dans le repère de base et la position du point B_i est obtenue à partir de la transformation base-organe terminal ${}^b T_e$ et la géométrie de l'organe terminal. Le modèle géométrique inverse est alors obtenu tout simplement :

$$\forall i = 1..6, q_i = \sqrt{\|\underline{AB}_i\|^2} \quad (3.15)$$

Le choix de la racine carrée positive découle également de considérations implicites sur le montage du robot.

┌

┐

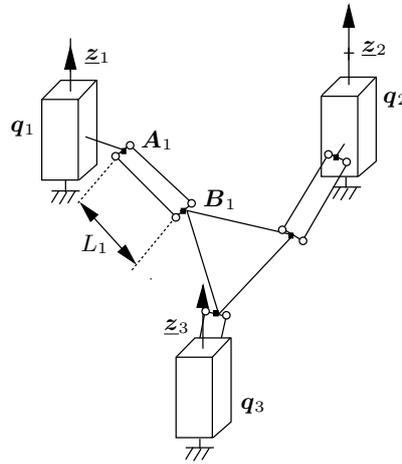


FIG. 3.3 – Représentation schématique du robot Delta linéaire

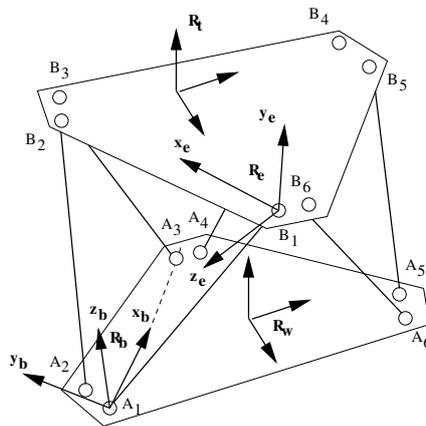


FIG. 3.4 – Représentation schématique de la plateforme de Gough-Stewart

Ces modèles sont suffisants pour permettre la commande modulaire (voir chapitre précédent). Pourtant, ces modèles ne décrivent pas entièrement la cinématique du robot considéré puisqu'il est nécessaire de faire des hypothèses sur le montage du robot pour choisir entre les modèles géométriques inverses possibles tirés du modèle géométrique implicite. Les raisons de cette incomplétude de modèle viennent de :

1. la mauvaise habitude de croire que les positions des moteurs définissent l'état d'un robot parallèle ;
2. l'impossibilité avec les seules mesures de ces positions d'écrire des modèles exploitables.

En réalité, le modèle complet est le *modèle géométrique implicite vectoriel* obtenu en écrivant la fermeture de chaîne cinématique de manière vectorielle. Reprenons nos exemples.

Exemple 4 : Modèles géométriques implicites vectoriels

A partir de la contrainte :

$$\forall i = 1..3, L_i \underline{\mathbf{u}}_i = \mathbf{AB}_i \quad (3.16)$$

on obtient le modèle géométrique implicite vectoriel du robot Delta :

$$\forall i = 1..3, -L_i \underline{\mathbf{u}}_i - \ell_i (\cos q_i \underline{\mathbf{x}}_i + \sin q_i \underline{\mathbf{y}}_i) + \mathbf{PB}_i = 0 \quad (3.17)$$

De la même manière, nous obtenons celui du robot Delta linéaire :

$$\forall i = 1..3, -L_i \underline{\mathbf{u}}_i - q_i \underline{\mathbf{z}}_i + \mathbf{PB}_i = 0 \quad (3.18)$$

et celui de la plateforme de Gough :

$$\forall i = 1..6, q_i \underline{\mathbf{u}}_i - \mathbf{AB}_i = 0 \quad (3.19)$$

Ainsi donc, les modèles géométriques sont simplifiés du moment qu'une mesure des $\underline{\mathbf{u}}_i$ est disponible. C'est le point de départ des travaux sur la *redondance métrologique* [SA91, Mer93, BA98, Mar02] : en rajoutant des capteurs proprioceptifs dans les articulations passives (information redondante), peut-on reconstituer une mesure complète (éventuellement, et le plus souvent d'ailleurs, redondante) de l'état du mécanisme ? Il s'avère en effet souvent plus simple de résoudre le problème géométrique direct si l'on dispose d'informations complémentaires aux variables articulaires motorisées. En fait, nous pensons même qu'il faut dissocier la mesure proprioceptive de l'actionnement. Par exemple, pour une plateforme de Gough-Stewart, la mesure des

directions des jambes ($\underline{\mathbf{u}}_i$) permet une résolution linéaire du problème géométrique direct (6 contraintes d'appartenance à une droite) alors que la mesure des longueurs des jambes (\mathbf{q}) est beaucoup plus complexe (6 contraintes d'appartenance à une sphère) [BA00a]. En revanche, il est beaucoup plus simple mécaniquement d'actionner les longueurs que les orientations. En pratique, il nous semble ainsi que le choix de l'actionnement des mécanismes parallèles existants est guidé par ces considérations de simplicité mécanique, mais qu'en revanche, le choix de la mesure est guidé par les mauvaises habitudes de la robotique sérielle.

Si la mesure des $\underline{\mathbf{u}}_i$ est parfois réalisable par le biais de capteurs articulaires, nous verrons que leur mesure par vision présente quelques petits avantages additionnels. Patience, patience !

Modèle géométrique implicite vectoriel Pour la suite, nous introduisons la terminologie suivante, pour chaque jambe i :

- l'*élément référent* de la jambe i est l'élément cinématique autour duquel la contrainte de fermeture cinématique est exprimée ;
- l'*extrémité basse* de la jambe i , notée \mathbf{A}_i , est l'extrémité de l'élément référent la plus proche de la base ;
- l'*extrémité haute*, notée \mathbf{B}_i , est l'extrémité de l'élément référent la plus proche de l'organe terminal ;
- la *droite référente* est la droite passant par les deux extrémités de l'élément référent ;
- le *vecteur référent* \mathbf{AB}_i est le vecteur joignant l'extrémité basse à l'extrémité haute ;
- la *direction référente* est le vecteur unitaire, noté $\underline{\mathbf{u}}_i$, orienté de l'extrémité basse vers l'extrémité haute : $\underline{\mathbf{u}}_i = \mathbf{AB}_i / \|\mathbf{AB}_i\|$.

Au vu du paragraphe précédent, nous proposons donc d'ajouter à la liste des modèles géométriques donnée au chapitre précédente le modèle géométrique implicite vectoriel, de forme générale :

$$G_{\vec{\phi}}(\mathbf{X}, \mathbf{q}, \mathbf{r}, \xi_{geom}) = \mathbf{0} \quad (3.20)$$

où \mathbf{r} désigne les informations redondantes. En l'occurrence, sur les exemples et sur tous les cas que nous avons étudiés jusqu'à présent (Delta de l'EPFL, H4, Par4, I4L et I4R du LIRMM, OrthoGlide de l'IRCCyN, Gough-Stewart), les informations redondantes \mathbf{r} doivent permettre la détermination des directions référentes $\underline{\mathbf{u}}_i$.

Un modèle moins général, mais plus pertinent sur les mécanismes étudiés, a pour forme :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, \alpha_i(\mathbf{X}, q_i, \xi_{geom}) \underline{\mathbf{u}}_i + \beta_i(\mathbf{X}, q_i, \xi_{geom}) = \mathbf{0} \quad (3.21)$$

où $\alpha_i(\mathbf{X}, q_i, \xi_{geom})$ est une fonction scalaire (la longueur de l'élément référent) et $\beta_i(\mathbf{X}, q_i, \xi_{geom})$ est une fonction vectorielle (l'expression du vecteur référent à partir

de la chaîne cinématique, dont on prend d'habitude la norme pour former le reste du modèle géométrique implicite scalaire).

Notons que la dépendance affichée ici est plus large que celle réellement rencontrée sur les mécanismes que nous avons étudiés. En effet, nous n'avons, à ce jour, identifié que deux formes distinctes. La première apparaît lorsque la contrainte de fermeture cinématique est écrite autour d'un élément cinématique de longueur L_i constante. Le modèle implicite vectoriel est alors de la forme :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, L_i \underline{\mathbf{u}}_i + \beta_i(\mathbf{X}, q_i, \xi_{geom}) = \mathbf{0} \quad (3.22)$$

où la variable articulaire se retrouve en dehors de l'élément cinématique. La seconde apparaît lorsque la contrainte de fermeture cinématique est écrite autour d'un élément cinématique constitué d'une liaison glissière (par exemple, plateforme de Gough-Stewart). Le modèle implicite vectoriel est alors de la forme :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, q_i \underline{\mathbf{u}}_i + \beta_i(\mathbf{X}, \xi_{geom}) = \mathbf{0} \quad (3.23)$$

Nous pourrions donc vraisemblablement ôter la dépendance en \mathbf{X} du terme α_i , mais la laisser ne complique pas outre mesure la suite du développement. Notons enfin qu'il serait également possible de remplacer la dépendance de la contrainte de fermeture cinématique formulée pour la jambe i en la seule variable articulaire q_i par une dépendance en l'ensemble des variables articulaire \mathbf{q} . Néanmoins, il semble peu probable qu'un mécanisme soit conçu avec une telle propriété. Nous préférons donc laisser un tel cas dans la formulation générique, afin de ne pas rendre inutilement complexe la suite du développement.

A partir de ce modèle géométrique implicite, il doit être possible d'obtenir les autres modèles géométriques par manipulations algébriques. Nous éviterons ici de mener ces manipulations car elles n'ont aucun intérêt pour la suite de notre exposé : rappelons-nous qu'un des principes fondamentaux d'une commande référencée capteurs est d'éviter l'utilisation de modèles géométriques.

En revanche, nous allons traiter avec un grand intérêt les modèles cinématiques qui découlent du modèle géométrique implicite vectoriel.

Modèle cinématique complet La cinématique d'un robot parallèle n'est pas entièrement décrite par le modèle cinématique inverse, en tant que relation entre la vitesse cartésienne de l'organe terminal et les vitesses des articulations motorisées, puisque ce modèle n'explique pas le comportement des articulations passives. En nous reposant sur le modèle géométrique implicite vectoriel, qui décrit entièrement la géométrie d'un robot parallèle, nous allons montrer comment obtenir un *modèle cinématique complet*.

Considérons le modèle géométrique implicite vectoriel (3.20) et dérivons le par

rapport au temps pour obtenir le *modèle cinématique implicite complet* :

$$\begin{aligned} \frac{\partial G_{\vec{\phi}}(X, \mathbf{q}, \mathbf{r}, \xi_{geom})}{\partial X} \mathbf{A} \boldsymbol{\tau} + \frac{\partial G_{\vec{\phi}}(X, \mathbf{q}, \mathbf{r}, \xi_{geom})}{\partial \mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} + \\ \frac{\partial G_{\vec{\phi}}(X, \mathbf{q}, \mathbf{r}, \xi_{geom})}{\partial \mathbf{r}} \dot{\mathbf{r}} + \frac{\partial G_{\vec{\phi}}(X, \mathbf{q}, \mathbf{r}, \xi_{geom})}{\partial \xi_{geom}} \dot{\xi}_{geom} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Ce modèle exhibe donc une relation (3 équations) entre les variations temporelles de tous les termes dont dépend la géométrie. En supposant des paramètres géométriques constants, nous pouvons donc réécrire cette relation sous la forme suivante :

$$\mathbf{C}_C \boldsymbol{\tau} + (\mathbf{C}_A \quad \mathbf{C}_R) \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{r}} \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (3.25)$$

qui, aux matrices cinématiques cartésienne \mathbf{C}_C et articulaire \mathbf{C}_A , adjoint une *matrice cinématique redondante* \mathbf{C}_R et explicite l'effet d'une vitesse cartésienne de l'organe terminal sur l'ensemble du mécanisme (articulations motorisées et informations redondantes). A partir de ce modèle implicite, il est alors possible d'extraire formellement le *modèle cinématique inverse complet*, qui fournit les variations internes du mécanisme en fonction du mouvement de l'organe terminal :

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{r}} \end{pmatrix} = -(\mathbf{C}_A \quad \mathbf{C}_R)^{-1} \mathbf{C}_C \boldsymbol{\tau} \quad (3.26)$$

sous réserve d'inversibilité de $(\mathbf{C}_A \quad \mathbf{C}_R)$.

Cette formulation générique est cependant peu exploitable. En revanche, le modèle (3.21), qui met en exergue la longueur de l'élément référent, va nous permettre de fournir une méthodologie plus constructive. Dans ce cas, pas si particulier, la démarche présentée ci-dessus aboutit au modèle cinématique implicite suivant, sous l'hypothèse de constance des paramètres géométriques :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, \alpha_i \dot{\mathbf{u}}_i + \left(\mathbf{u}_i \frac{\partial \alpha_i}{\partial q_i} + \frac{\partial \beta_i}{\partial \mathbf{q}} \right) \dot{q}_i + \left(\mathbf{u}_i \frac{\partial \alpha_i}{\partial X} + \frac{\partial \beta_i}{\partial X} \right) \mathbf{A} \boldsymbol{\tau} = \mathbf{0} \quad (3.27)$$

dans lequel nous avons omis, par souci de lisibilité, la dépendance de α_i et β_i à X, \mathbf{q} et ξ_{geom} , qui restera implicite par la suite.

Nous pouvons réécrire cette relation de manière à faire apparaître les composantes pour chaque jambe des matrices cinématiques articulaire $\mathbf{C}_{A_i} = \mathbf{u}_i \frac{\partial \alpha_i}{\partial q_i} + \frac{\partial \beta_i}{\partial q_i}$ et cartésienne $\mathbf{C}_{C_i} = \left(\mathbf{u}_i \frac{\partial \alpha_i}{\partial X} + \frac{\partial \beta_i}{\partial X} \right) \mathbf{A}$:

$$\forall i = 1..N_{jambes}, \alpha_i \dot{\mathbf{u}}_i + \mathbf{C}_{A_i} \dot{q}_i + \mathbf{C}_{C_i} \boldsymbol{\tau} = \mathbf{0} \quad (3.28)$$

Projetons cette relation sur les $\underline{\mathbf{u}}_i$ en utilisant le fait que ces derniers sont unitaires ($(\underline{\mathbf{u}}_i \cdot \underline{\mathbf{u}}_i) = 1$ et $(\underline{\mathbf{u}}_i \cdot \dot{\underline{\mathbf{u}}}_i) = 0$) :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, (\underline{\mathbf{u}}_i \cdot (\mathbf{C}_{Ai} \dot{q}_i)) + (\underline{\mathbf{u}}_i \cdot (\mathbf{C}_{Ci} \boldsymbol{\tau})) = 0 \quad (3.29)$$

En utilisant la notation vectorielle du produit scalaire $(x \cdot y) = {}^t xy$, nous obtenons alors le modèle cinématique implicite habituel :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, ({}^t \underline{\mathbf{u}}_i \mathbf{C}_{Ai}) \dot{q}_i + ({}^t \underline{\mathbf{u}}_i \mathbf{C}_{Ci}) \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (3.30)$$

En constatant que le produit $({}^t \underline{\mathbf{u}}_i \mathbf{C}_{Ai})$ est un scalaire et en dehors des cas où il s'annule (singularités articulaires), nous avons donc le modèle cinématique inverse habituel :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, \dot{q}_i = -\frac{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i}{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i \mathbf{C}_{Ai}} \mathbf{C}_{Ci} \boldsymbol{\tau} \quad (3.31)$$

En reportant ce résultat dans (3.28), nous obtenons :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, \alpha_i \dot{\underline{\mathbf{u}}}_i - \mathbf{C}_{Ai} \frac{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i}{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i \mathbf{C}_{Ai}} \mathbf{C}_{Ci} \boldsymbol{\tau} + \mathbf{C}_{Ci} \boldsymbol{\tau} = \mathbf{0} \quad (3.32)$$

En regroupant les termes, nous avons donc le complément du modèle cinématique implicite, reliant la variation des directions référentes au mouvement de l'organe terminal :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, \alpha_i \dot{\underline{\mathbf{u}}}_i + \left(\mathbf{I}_3 - \frac{\mathbf{C}_{Ai} {}^t \underline{\mathbf{u}}_i}{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i \mathbf{C}_{Ai}} \right) \mathbf{C}_{Ci} \boldsymbol{\tau} = \mathbf{0} \quad (3.33)$$

qui, en dehors du cas pathologique où la longueur α_i s'annule, nous donne le complément du modèle cinématique inverse :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, \dot{\underline{\mathbf{u}}}_i = -\frac{1}{\alpha_i} \left(\mathbf{I}_3 - \frac{\mathbf{C}_{Ai} {}^t \underline{\mathbf{u}}_i}{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i \mathbf{C}_{Ai}} \right) \mathbf{C}_{Ci} \boldsymbol{\tau} \quad (3.34)$$

Nous pouvons désormais énoncer le théorème suivant :

Théorème 1 (Modèle cinématique inverse complet)

Si l'expression des contraintes cinématiques dans un mécanisme parallèle peut se mettre sous la forme :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, \alpha_i(X, q_i, \xi_{geom}) \underline{\mathbf{u}}_i + \beta_i(X, q_i, \xi_{geom}) = \mathbf{0} \quad (3.35)$$

alors le modèle cinématique inverse complet, décrivant l'effet du mouvement de l'organe terminal sur l'ensemble du mécanisme est :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, \dot{q}_i = \mathbf{C}_{I_{q_i}} \boldsymbol{\tau} \quad \mathbf{C}_{I_{q_i}} = -\frac{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i}{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i \mathbf{C}_{A_i}} \mathbf{C}_{C_i} \quad (3.36)$$

$$\forall i = 1..N_{jambes}, \dot{\underline{\mathbf{u}}}_i = \mathbf{C}_{I_{\underline{\mathbf{u}}_i}} \boldsymbol{\tau} \quad \mathbf{C}_{I_{\underline{\mathbf{u}}_i}} = -\frac{1}{\alpha_i} \left(\mathbf{I}_3 - \frac{\mathbf{C}_{A_i} {}^t \underline{\mathbf{u}}_i}{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i \mathbf{C}_{A_i}} \right) \mathbf{C}_{C_i} \quad (3.37)$$

où $\mathbf{C}_{I_{q_i}}$ est la matrice cinématique inverse associée aux variables articulaires actionnées et $\mathbf{C}_{I_{\underline{\mathbf{u}}_i}}$ est la matrice cinématique inverse associée aux directions référentes.

En suivant la méthodologie proposée, nous pouvons reprendre l'Exemple 4 pour donner le modèle cinématique complet des trois cas d'école de la robotique parallèle.

Exemple 5 : Modèle cinématique inverse complet du robot Delta

┌

┐

$$\forall i = 1..3, \dot{q}_i = \frac{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i}{\ell_i {}^t \underline{\mathbf{u}}_i (-\sin q_i \underline{\mathbf{x}}_i + \cos q_i \underline{\mathbf{y}}_i)} \mathbf{v}_e \quad (3.38)$$

$$\forall i = 1..3, \dot{\underline{\mathbf{u}}}_i = -\frac{1}{L_i} \left(\mathbf{I}_3 - \frac{(-\sin q_i \underline{\mathbf{x}}_i + \cos q_i \underline{\mathbf{y}}_i) {}^t \underline{\mathbf{u}}_i}{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i (-\sin q_i \underline{\mathbf{x}}_i + \cos q_i \underline{\mathbf{y}}_i)} \right) \mathbf{v}_e \quad (3.39)$$

┌

┐

Exemple 6 : Modèle cinématique inverse complet du robot Delta linéaire

┌

┐

$$\forall i = 1..3, \dot{q}_i = \frac{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i}{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i \underline{\mathbf{z}}_i} \mathbf{v}_e \quad (3.40)$$

$$\forall i = 1..3, \dot{\underline{\mathbf{u}}}_i = -\frac{1}{L_i} \left(\mathbf{I}_3 - \frac{\underline{\mathbf{z}}_i {}^t \underline{\mathbf{u}}_i}{{}^t \underline{\mathbf{u}}_i \underline{\mathbf{z}}_i} \right) \mathbf{v}_e \quad (3.41)$$

┌

┐



FIG. 3.5 – Le robot I4L

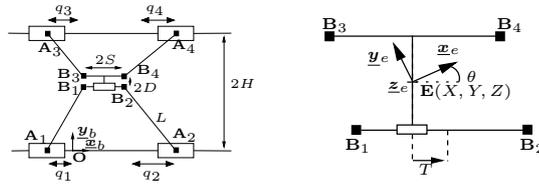


FIG. 3.6 – Description cinématique du robot I4L

Exemple 7 : Modèle cinématique inverse complet de la plateforme de Gough-Stewart

Si l'on dérive le modèle géométrique implicite vectoriel de la plateforme de Gough-Stewart dans son repère de base, nous aboutissons à :

$$\forall i = 1..6, \dot{q}_i = {}^{tb}\underline{u}_i (\mathbf{I}_3 - [{}^b\mathbf{E}\mathbf{B}_i]_{\wedge}) {}^b\boldsymbol{\tau}_e \quad (3.42)$$

$$\forall i = 1..6, {}^b\underline{\dot{u}}_i = \frac{1}{q_i} (\mathbf{I}_3 - {}^b\underline{u}_i {}^{tb}\underline{u}_i) (\mathbf{I}_3 - [{}^b\mathbf{E}\mathbf{B}_i]_{\wedge}) {}^b\boldsymbol{\tau}_e \quad (3.43)$$

Profitons de l'occasion de ce bilan pour introduire un nouveau robot dans notre base d'exemple, qui sera utile pour la suite.

Exemple 8 : Modélisation complète du I4L

Considérons une version générique du robot I4L [KCB⁺03] du LIRMM (Figure 3.5), dans lequel les moteurs sont cependant en configuration quelconque. Alors, en prenant pour élément référent le parallélogramme de chaque jambe, nous avons le modèle géométrique implicite vectoriel du I4L :

$$\forall i = 1..4, L_i {}^b\underline{u}_i - \mathbf{A}\mathbf{B}_i = \mathbf{0}_{3 \times 1} \quad (3.44)$$

avec

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{A}_i(q_i) = \mathbf{A}_{i_0} + q_i \mathbf{z}_i \quad \mathbf{B}_i = \mathbf{B}_i(X) = \mathbf{E} + (\delta_i K \theta + \epsilon_i S) \mathbf{x}_b + \sigma_i D \mathbf{y}_b$$

où \mathbf{E} est la position de l'organe terminal, θ est l'angle de l'organe terminal (proportionnel au déplacement relatif T des deux demi-nacelles : $\theta = T/K$), $\delta_3 = \delta_4 = \epsilon_2 = \epsilon_4 = \sigma_3 = \sigma_4 = 1$, $\delta_1 = \delta_2 = 0$, $\epsilon_1 = \epsilon_3 = \sigma_1 = \sigma_2 = -1$ et les autres notations sont définies dans la Figure 3.6.

A partir de ce modèle géométrique implicite vectoriel, nous pouvons obtenir le modèle cinématique complet du 14L en appliquant la méthodologie présentée ci-dessus :

$$\forall i = 1..4, \dot{q}_i = \frac{{}^t \mathbf{u}_i}{{}^t \mathbf{z}_i \mathbf{u}_i} \left(\mathbf{I}_3 \quad \delta_i K \mathbf{x}_b \right) \begin{pmatrix} \mathbf{v}_e \\ \omega \end{pmatrix} \quad (3.45)$$

$$\forall i = 1..4, \dot{\mathbf{u}}_i = \frac{1}{L_i} \left(\mathbf{I}_3 - \frac{\mathbf{z}_i {}^t \mathbf{u}_i}{{}^t \mathbf{z}_i \mathbf{u}_i} \right) \left(\mathbf{I}_3 \quad \delta_i K \mathbf{x}_b \right) \begin{pmatrix} \mathbf{v}_e \\ \omega \end{pmatrix} \quad (3.46)$$

où $\omega = \dot{\theta} = \dot{T}/K$ est la vitesse de rotation de l'organe terminal.

Dans le montage fait au LIRMM, les axes \mathbf{z}_i des moteurs sont tous parallèles à l'axe \mathbf{x}_b . En prenant la convention, $\forall i = 1..4, \mathbf{z}_i = \mathbf{x}_b$, le modèle cinématique complet devient alors :

$$\forall i = 1..4, \dot{q}_i = \left(\frac{{}^t \mathbf{u}_i}{{}^t \mathbf{u}_i \mathbf{x}_b} \quad \delta_i K \right) \begin{pmatrix} \mathbf{v}_e \\ \omega \end{pmatrix} \quad (3.47)$$

$$\forall i = 1..4, \dot{\mathbf{u}}_i = \left(\mathbf{I}_3 - \frac{\mathbf{x}_b {}^t \mathbf{u}_i}{{}^t \mathbf{u}_i \mathbf{x}_b} \quad 0 \right) \begin{pmatrix} \mathbf{v}_e \\ \omega \end{pmatrix} \quad (3.48)$$

┌

On remarque sur tous ces exemples que les directions référentes sont un composant essentiel des matrices cinématiques inverses articulaire et redondante. Aussi, plutôt que de devoir reconstruire ces directions à partir de la résolution du problème géométrique direct, vaut-il mieux les mesurer : *les matrices cinématiques sont mesurées plutôt qu'estimées!*

Ces mesures ne sont pour autant pas nécessairement obtenues par vision. En effet, pour obtenir un vecteur unitaire de dimension 3, il suffit de deux angles. On peut donc parfaitement envisager d'instrumenter le mécanisme en y insérant deux capteurs angulaires. Cependant, nous y voyons un certain nombre d'inconvénients :

- La conception et la réalisation mécanique sont rendues plus complexes. En effet, il faut concevoir et dimensionner une quantité non négligeable de formes et pièces afin de fixer les capteurs sur les liaisons. De plus, il faut s'assurer que les axes de rotation des capteurs sont correctement alignés sur les axes des liaisons.

└

- Les directions référentes, qui sont essentiellement des grandeurs de l'espace cartésien, sont chacune mesurées en deux parties disjointes dans deux espaces monodimensionnels. Il faut donc reconstruire ces directions dans le même espace cartésien par le biais d'un modèle géométrique, tenant compte de l'assemblage mécanique. Cela engendre donc une augmentation non négligeable de la dimension de l'ensemble des paramètres géométriques à identifier.
- La mesure des directions référentes par des capteurs articulaires peut réduire l'agilité du robot. En effet, cela peut rajouter des frottements selon la technologie utilisée, mais surtout, cela peut changer la nature des liaisons employées. Par exemple, pour réaliser un parallélogramme, on peut utiliser quatre liaisons hémisphériques, très simples à réaliser et n'ayant que peu d'effet sur la dynamique du robot, mais difficiles à instrumenter. On peut à l'inverse utiliser quatre liaisons Cardan, plus simples à instrumenter, mais un peu plus complexes à réaliser et possédant soit plus de frottements, soit plus de masse, donc plus d'effets sur la dynamique du robot.
- Il faut s'assurer de la simultanéité des mesures de direction dans chaque jambe. A l'inverse, une mesure par vision offre plusieurs avantages :
 - mesure simultanée de toutes les directions ;
 - mesure directement dans le même espace, l'espace cartésien où ces mesures sont requises ;
 - mesure sans contact ;
 - faible augmentation de la dimension des paramètres à identifier.

Vers un modèle géométrique projectif unifié

D'après le théorème précédent, si les directions référentes \underline{u}_i décrivent (de manière redondante) l'état du robot parallèle, alors nous verrons qu'il est possible de définir une commande référencée capteurs, basée sur la seule mesure de ces directions. Cependant, le cas du robot I4L, tel qu'il est construit au LIRMM (Figure 3.5), nous montre que les \underline{u}_i ne décrivent pas forcément l'état d'un robot parallèle. En effet, le modèle géométrique implicite vectoriel s'obtient en prenant pour élément référent de chaque jambe le parallélogramme qui la compose. Or, d'après (3.48), un mouvement égal sur chaque moteur provoque une translation pure de l'ensemble du mécanisme, laissant invariant les directions référentes (Figure 3.7). En revanche, sur ce même exemple, on se rend compte que la droite référente de chaque jambe a varié lors d'un tel mouvement, ce qui est observable visuellement.

Il nous faut donc approfondir notre étude cinématique pour tendre vers un modèle projectif unifié décrivant entièrement la cinématique du robot dans l'image. Nous allons donc partir de l'espace cartésien, espace d'expression de la cinématique, pour atteindre divers espaces de mesure, dans lesquels la commande peut être envisagée.

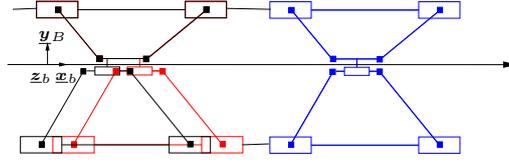


FIG. 3.7 – Mouvements du robot I4L laissant les directions référentes invariantes.

Droites référentes Le premier espace de mesure envisageable est l'ensemble \mathcal{U} des directions référentes. Il découle immédiatement du modèle géométrique implicite vectoriel et peut suffire à la commande dans la plupart des cas de robots parallèles.

L'espace de mesure suivant est l'ensemble \mathcal{D} des droites référentes. En effet, la connaissance d'un point sur un élément référent (par exemple, l'une de ses deux extrémités) associée à la connaissance de la direction référente permet de définir entièrement la droite référente. Cet ensemble est le produit cartésien de l'ensemble \mathcal{U} par l'ensemble \mathcal{M} des moments des droites référentes. Cet ensemble \mathcal{M} peut également être envisagé, de même que l'ensemble Π des plans d'interprétation passant par les deux extrémités de chaque élément référent, qui ne sont que les moments normalisés. En revanche, il semble peu raisonnable d'envisager d'utiliser les profondeurs des droites référentes, difficiles à mesurer.

Ainsi donc, nous pouvons envisager d'utiliser pour la mesure les différentes combinaisons des composantes des coordonnées de Plücker des droites référentes :

- $\underline{\mathbf{u}}_i, i = 1..N_{jambes}$
- $\underline{\mathbf{n}}_i, i = 1..N_{jambes}$
- $p_i \underline{\mathbf{n}}_i, i = 1..N_{jambes}$
- $(\underline{\mathbf{u}}_i, p_i \underline{\mathbf{n}}_i), i = 1..N_{jambes}$
- $(\underline{\mathbf{u}}_i, \underline{\mathbf{n}}_i), i = 1..N_{jambes}$

Avant d'aller plus avant dans la discussion, établissons la proposition suivante.

Proposition 8 (Droites référentes et état)

Si l'élément référent de chaque jambe est l'élément lié à la plateforme mobile, alors les droites référentes sont équivalentes à l'état.

Preuve :

Par définition, $({}^c \mathbf{CB}_i \wedge {}^c \underline{\mathbf{u}}_i)$ est le moment de la droite référente, d'où

$$\forall i = 1..N_{jambes}, p_i {}^c \underline{\mathbf{n}}_i = ({}^c \mathbf{CB}_i \wedge {}^c \underline{\mathbf{u}}_i) \quad (3.49)$$

qui se décompose en :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, p_i {}^c \underline{\mathbf{n}}_i = ({}^c \mathbf{CE} \wedge {}^c \underline{\mathbf{u}}_i) + ({}^c \mathbf{EB}_i \wedge {}^c \underline{\mathbf{u}}_i) \quad (3.50)$$

Les moments des droites référentes sont donc directement fonction de l'état du robot :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, {}^c p_i {}^c \underline{n}_i = ({}^c \underline{t}_e \wedge {}^c \underline{u}_i) + ({}^c \mathbf{R}_e {}^e \mathbf{E} \mathbf{B}_i \wedge {}^c \underline{u}_i) \quad (3.51)$$

où ${}^e \mathbf{E} \mathbf{B}_i$ est une constante définissant la géométrie de la plateforme.

Inversement, nous pouvons remonter des coordonnées des droites référentes à l'état. En effet, en prenant le produit vectoriel de la direction référente par l'expression ci-dessus, dans laquelle les inconnues sont désormais les paramètres de pose, nous obtenons :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, {}^c p_i {}^c \underline{o}_i = (\mathbf{I}_3 - {}^c \underline{u}_i {}^t c \underline{u}_i) ({}^c \underline{t}_e + {}^c \mathbf{R}_e {}^e \mathbf{E} \mathbf{B}_i) \quad (3.52)$$

Comme $\mathbf{I}_3 - {}^c \underline{u}_i {}^t c \underline{u}_i$ est l'opérateur de projection perpendiculaire à ${}^c \underline{u}_i$, nous en déduisons que :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, {}^c \underline{t}_e + {}^c \mathbf{R}_e {}^e \mathbf{E} \mathbf{B}_i = {}^c p_i {}^c \underline{o}_i + \lambda_i {}^c \underline{u}_i \quad (3.53)$$

dont on peut déduire ${}^c \underline{t}_e$ et ${}^c \mathbf{R}_e$ après quelques manipulations algébriques.

Par conséquent, nous pouvons retrouver l'état du robot à partir des droites référentes. \square

Pour étendre la portée de cette proposition, il faudrait en toute rigueur en étudier les cas singuliers, éventuellement relâcher la contrainte voulant que les éléments référents soient liés à la plateforme mobile. Pour répondre formellement à la question de savoir quelles sont les combinaisons proposées plus haut qui permettent effectivement la commande, il faudrait également voir en quelle mesure nous pouvons réduire la connaissance sur les droites référentes sans pour autant perdre la capacité de reconstituer la pose. Ceci nous emmènerait relativement loin et nous en resterons donc là dans ce document.

Nous en retiendrons l'intuition que l'observation des éléments cinématiques devrait être équivalente à l'état d'un robot parallèle, qui sera justifiée partiellement et pragmatiquement dans la suite de ce document. Notons qu'il nous semble peu utile de faire le calcul effectif de la pose à partir des droites référentes et qu'il vaut mieux se contenter de considérer ces dernières comme une représentation redondante de l'état. Elles constituent donc une *observation indirecte de l'état*, en opposition avec le chapitre précédent où le couple caméra-mire permettait l'observation directe de l'état.

Le problème revient alors à mesurer ces droites référentes. Dans le cas où l'on veut utiliser un capteur extéroceptif plutôt que des capteurs articulaires, il faut reconstruire leurs différentes composantes à partir du signal capteur. Cela peut se faire de deux manières : exploitation de marqueurs placés sur l'élément référent ou extraction de la forme de l'élément référent depuis une image.



FIG. 3.8 – Quelques robots parallèles.

Dans le premier cas, il sera nécessaire de placer les marqueurs de manière à la fois pertinente (simplicité de l'estimation de la direction à partir des marqueurs) et précise (estimation non biaisée). Dans le second cas, il faudra alors très probablement disposer d'un modèle CAO de chaque élément observé et d'un outil de détection et de suivi de ces éléments dans l'image. De tels outils ont été proposés depuis quelques années [MH02, DC00, CMC06], qui peuvent fonctionner avec des objets de forme complexe.

Dans presque tous les cas ci-dessus, nous devons donc reconstruire une partie des droites référentes, qui n'ont pas d'existence matérielle, depuis le signal capteur. Cela ressemble donc à de l'asservissement visuel sur des points 3D, où la commande n'est pas faite directement dans l'espace image mais après une phase de reconstruction. Dans le cas où l'on n'utilise que les plans d'interprétation \underline{n}_i des droites référentes, nous sommes toutefois bien dans un cas projectif, puisque les plans d'interprétation équivalent aux projections des droites 3D dans l'image. Toutefois, ce cas n'est pas encore complètement satisfaisant puisque nous projetons dans l'image des droites sans existence matérielle, donc sans existence visuelle immédiate.

Il faut donc poursuivre notre quête du modèle cinématique projectif en nous rapprochant encore de l'image. Pour cela, nous pouvons nous reposer sur les formes et sous-ensembles cinématiques les plus fréquemment observés sur les robots parallèles : cylindres ou parallélogrammes. Ces formes et sous-ensembles sont le plus souvent préférés à des formes plus complexes pour des raisons à la fois de rigidité et de simplicité de mise en œuvre. Nous ne restreignons par là que très peu le champ applicatif de notre méthodologie. Pour le plus grand bonheur de la projection perspective, ces sous-ensembles sont, de surcroît, le plus souvent constitués de cylindres de révolution.

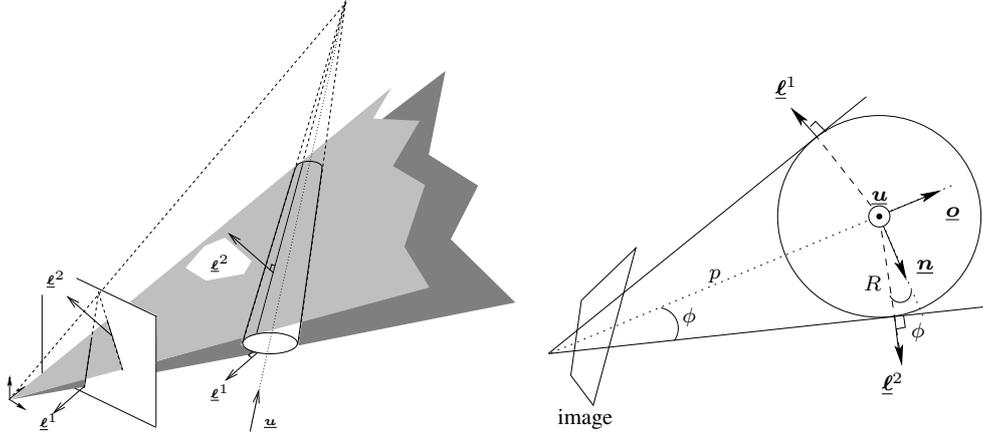


FIG. 3.9 – Projection d'un cylindre dans l'image

Cylindres référents Considérons un cylindre de révolution de rayon R et de longueur infinie ou inconnue. La projection de ce cylindre dans l'image dépend de sa position dans l'espace par rapport au repère de la caméra, qui est uniquement définie par la position de son axe (droite support) dans le repère caméra, donc par ses coordonnées de Plücker $({}^c \underline{\mathbf{u}}_{axe}, {}^c \underline{\mathbf{n}}_{axe}, {}^c p_{axe})$.

La projection d'un cylindre de révolution dans l'image donne deux droites (appelées *limbes*¹), qui sont obtenues à partir des deux plans passant par le centre de projection et tangents au cylindre (Figure 3.9). Analytiquement, cela se traduit par :

$${}^c \underline{\ell}^1 = -\frac{\sqrt{{}^c p_{axe}^2 - R^2}}{{}^c p_{axe}} {}^c \underline{\mathbf{n}}_{axe} - \frac{R}{{}^c p_{axe}} {}^c \underline{\mathbf{o}}_{axe} \quad (3.54)$$

$${}^c \underline{\ell}^2 = \frac{\sqrt{{}^c p_{axe}^2 - R^2}}{{}^c p_{axe}} {}^c \underline{\mathbf{n}}_{axe} - \frac{R}{{}^c p_{axe}} {}^c \underline{\mathbf{o}}_{axe} \quad (3.55)$$

où nous avons pris la convention que les normales sortent du cylindre. Ainsi, les coordonnées \mathbf{P} de tout point P situé sur l'axe du cylindre vérifient :

$$\forall j = 1..2, (\mathbf{CP} \cdot \underline{\ell}^j) = -R \quad (3.56)$$

et ce, grâce au fait que nous avons pris pour convention de travailler avec des vecteurs normaux unitaires.

Inversement, en utilisant (3.54) et (3.55), on peut reconstruire l'axe à partir des limbes et de la connaissance du rayon. En effet, la direction de l'axe, exprimée dans le repère caméra, est obtenue de manière immédiate par :

$${}^c \underline{\mathbf{u}}_{axe} = \frac{({}^c \underline{\ell}^1 \wedge {}^c \underline{\ell}^2)}{\|({}^c \underline{\ell}^1 \wedge {}^c \underline{\ell}^2)\|} \quad (3.57)$$

¹Sans doute par analogie avec le bord lumineux d'un astre (définition du Larrousse).

et les deux autres composantes par :

$${}^c \underline{\mathbf{n}}_{axe} = \frac{{}^c \underline{\boldsymbol{\ell}}^1 - {}^c \underline{\boldsymbol{\ell}}^2}{\|{}^c \underline{\boldsymbol{\ell}}^1 - {}^c \underline{\boldsymbol{\ell}}^2\|} \quad (3.58)$$

$${}^c p_{axe} = \frac{2R}{\sqrt{4 - \|{}^c \underline{\boldsymbol{\ell}}^1 - {}^c \underline{\boldsymbol{\ell}}^2\|^2}} \quad (3.59)$$

Remarque 4

Seule la profondeur de l'axe dépend du rayon du cylindre, et ce de manière proportionnelle. Les deux autres composantes de l'axe, adimensionnelles, peuvent être reconstruites sans connaissance a priori sur la taille du cylindre.

Les coordonnées de l'axe d'un cylindre de révolution sont donc équivalentes à la donnée de sa projection dans l'image et son rayon. Alternativement, la projection d'un cylindre de révolution dans l'image est équivalente à la donnée de ses coordonnées et de son rayon.

Par conséquent, nous pouvons énoncer le théorème suivant :

Théorème 2

La projection dans l'image (${}^c \underline{\boldsymbol{\ell}}^1, {}^c \underline{\boldsymbol{\ell}}^2$) d'un élément référent ayant une forme cylindrique axé sur la droite référente de coordonnées (${}^c \underline{\mathbf{u}}, {}^c \underline{\mathbf{n}}, {}^c p$) fournit les deux premières composantes de la droite référente et la troisième à la connaissance près du rayon R du cylindre :

$$({}^c \underline{\boldsymbol{\ell}}^1, {}^c \underline{\boldsymbol{\ell}}^2) \Rightarrow ({}^c \underline{\mathbf{u}}, {}^c \underline{\mathbf{n}}, \frac{{}^c p}{R}) \quad (3.60)$$

Par conséquent, en conjugant ce résultat avec la Proposition 8, nous pouvons formuler une nouvelle proposition qui est fondamentale :

Proposition 9 (Proposition fondamentale)

Si les éléments référents d'un robot parallèle sont liés à la plateforme mobile et si ces éléments sont des cylindres de révolution axé sur les droites référentes, alors l'observation des limbes est équivalente à l'observation de l'état du robot.

Cette proposition a pour conséquence que l'identification et la commande sont rendues possible par la simple observation des éléments cylindriques. Cela peut se faire *en se ramenant au cas précédent*, c'est-à-dire en trouvant des méthodes numériques qui reconstruiront explicitement l'état à partir des mesures puis en reprenant les résultats présentés dans le chapitre précédent concernant l'observation de l'organe terminal. Cela peut se faire de manière plus élégante, en utilisant implicitement l'équivalence des limbes avec l'état, ce qui fait l'objet de quasiment tout le reste de ce chapitre.

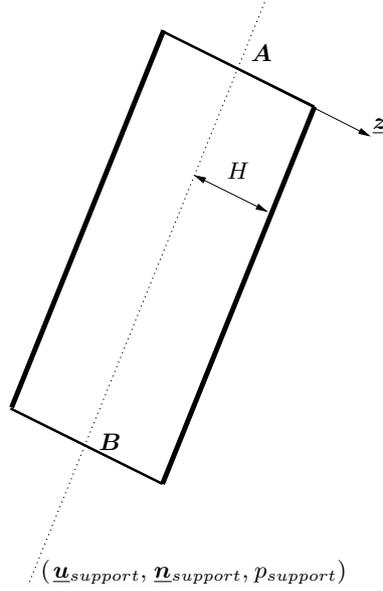


FIG. 3.10 – Notations pour la construction d'un parallélogramme

Parallélogrammes référents Les parallélogrammes que l'on trouve dans les robots parallèles sont en général constitués de deux petits côtés de formes diverses, sans influence sur la cinématique, et de deux grands côtés cylindriques, cinématiquement pertinents.

Un parallélogramme est donc défini par les milieux A et B des petits côtés (qui définissent la droite support du parallélogramme) et du décalage spatial $\pm H \underline{z}$ des coins par rapport aux points A ou B (Figure 3.10).

A partir de la droite support du parallélogramme, nous pouvons trouver les droites supports des grands côtés :

$$\underline{u}_{côté} = \underline{u}_{support} \quad (3.61)$$

$$p_{côté} \underline{n}_{côté} = p_{support} \underline{n}_{support} \pm H (\underline{z} \wedge \underline{u}_{support}) \quad (3.62)$$

où $(\underline{u}_{support}, \underline{n}_{support}, p_{support})$ sont les coordonnées de la droite support du parallélogramme et le signe dans (3.62) dépend du côté (gauche/droit) considéré.

Ces expressions s'inversent aisément pour retrouver la droite support du parallélogramme à partir des droites supports des grands côtés. Si les grands côtés sont réalisés physiquement par des cylindres de révolution, ce qui est fréquent, alors, en réutilisant les résultats précédents, nous pouvons projeter le parallélogramme dans l'image et reconstruire sa droite support depuis les limbes des grands côtés. Cela nous permet donc de déduire de la Proposition fondamentale (Proposition 9), la proposition suivante :

Proposition 10

Si les éléments référents d'un robot parallèle sont liés à la plateforme mobile et si ces éléments sont des parallélogrammes axés sur les droites référentes et dont les grands côtés sont des cylindres de révolution, alors l'observation des limbes des grands côtés est équivalente à l'observation de l'état du robot.

En conclusion de ce paragraphe, nous pouvons donc raisonnablement considérer qu'il existe une représentation projective de la cinématique d'un robot parallèle. Nous avons donné les briques de base nécessaires à la construction du modèle géométrique projectif dans le cas des éléments référents ayant pour forme un cylindre de révolution ou un parallélogramme formé sur deux cylindres de révolution. Dans la prochaine partie, nous allons étudier les versions différentielles de ces modèles, qui serviront à établir des lois de commandes.

3.4 Commande

Nous pouvons associer des lois de commande à chaque espace de mesure présenté ci-dessus, des espaces les plus proches de la cinématique aux plus proches de l'image. Nous n'en détaillerons que trois : asservissement visuel des directions référentes, asservissement visuel des limbes d'éléments référents cylindrique et asservissement visuel des limbes d'éléments référents constitués d'un parallélogramme.

Variables articulaires

Tout d'abord un mot sur la commande dans l'espace articulaire, lorsque l'on observe les éléments cinématiques plutôt que l'organe terminal. La différence entre les deux schémas de commande provient juste de la manière dont les directions référentes, qui figurent dans la matrice cinématique inverse articulaire, sont obtenues. Au chapitre précédent, nous les obtenions à partir de la pose mesurée et du modèle géométrique inverse, ce qui supposait une forte dose d'étalonnage. A l'inverse, l'observation directe des éléments référents est beaucoup plus directe d'un point de vue algorithmique et ne requiert aucun étalonnage. En revanche, il se peut que la boucle de commande soit un peu plus lente, car le suivi dans l'image de droites est plus gourmand que le suivi de points.

Directions référentes

A première vue, les directions référentes jouent quasiment le même rôle que les variables articulaires dans les modèles cinématiques, puisqu'elles désignent une partie de l'état interne du robot. Cependant, nous avons vu qu'il est souvent plus simple de reconstruire l'état du robot à partir des droites référentes qu'à partir

des variables articulaires. Par ailleurs, les exemples du robot Delta linéaire et du robot I4L montrent une dépendance de la matrice cinématique inverse complète aux seules directions référentes. Il semblerait donc que les directions référentes soient plus représentatives de la cinématique que les variables articulaires, ce que nous avons formellement démontré dans le cas où les éléments référents sont liés à l'organe terminal. De là à suggérer qu'il faille actionner les directions référentes plutôt que les articulations habituelles, il y a un pas que nous hésitons à franchir. En effet, les directions référentes sont le plus souvent associées à des articulations complexes et il est plus simple technologiquement d'actionner des articulations glissières ou pivots. En revanche, nous pensons qu'il est plus pertinent de faire la commande dans l'espace des directions référentes plutôt que dans l'espace articulaire. De plus, suivant les résultats du chapitre précédent, il n'est pas impossible que cette commande puisse être rendue indépendante de la mesure articulaire. Nous confirmons donc ici notre préconisation de dissocier actionnement et perception.

A partir de la mesure des directions référentes ${}^c\mathbf{u}_i$ de chaque jambe i , nous pouvons construire une erreur entre chacune de ces directions et leur direction de consigne ${}^c\mathbf{u}_i^*$, soit en considérant ces directions comme de simples vecteurs (l'erreur est alors de la forme : ${}^c\mathbf{u}_i^* - {}^c\mathbf{u}_i$), soit en se plaçant sur la sphère unité. Dans ce cas, plus propre théoriquement, l'erreur sur chaque jambe est définie par :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, \mathbf{e}_i = ({}^c\mathbf{u}_i^* \wedge {}^c\mathbf{u}_i) \quad (3.63)$$

La dérivée de cette erreur, à consigne constante, est donc :

$$\forall i = 1..N_{jambes}, \dot{\mathbf{e}}_i = ({}^c\mathbf{u}_i^* \wedge {}^c\dot{\mathbf{u}}_i) = [{}^c\mathbf{u}_i^*]_{\wedge} {}^c\mathbf{C}_{I_{\mathbf{u}_i}} {}^c\boldsymbol{\tau} \quad (3.64)$$

Empilons ces erreurs sur chaque jambe en un seul vecteur d'erreur :

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{e}_{N_{jambes}} \end{pmatrix} \quad (3.65)$$

Une pseudo-commande dans l'espace cartésien est donc :

$${}^c\boldsymbol{\tau} = -\lambda \widehat{\mathbf{M}^T}^+ \mathbf{e} \quad \lambda > 0 \quad (3.66)$$

où la matrice \mathbf{M}^T est définie par :

$$\mathbf{M}^T = \begin{pmatrix} [{}^c\mathbf{u}_1^*]_{\wedge} {}^c\mathbf{C}_{I_{\mathbf{u}_1}} \\ \vdots \\ [{}^c\mathbf{u}_{N_{jambes}}^*]_{\wedge} {}^c\mathbf{C}_{I_{\mathbf{u}_{N_{jambes}}}} \end{pmatrix} \quad (3.67)$$

Contrairement au cas sériel, nous ne pouvons pas nous arrêter à la définition de cette pseudo-commande en supposant qu'une commande interne la réalise au niveau articulaire. En conséquence, la pseudo-commande doit ensuite être appliquée effectivement aux moteurs grâce à la matrice cinématique inverse articulaire :

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \widehat{c\mathbf{C}_{I_q}} \widehat{\mathbf{M}^T}^+ \mathbf{e} \quad \lambda > 0 \quad (3.68)$$

Notons que dans cette commande, nous n'avons pas précisé en quel point la pseudo-commande s'appliquait, et par conséquent, en quel point les matrices cinématiques devaient être évaluées. En revanche, le repère dans lequel se fait cette évaluation est forcément le repère caméra. Nous verrons que cette liberté de choix est très utile.

Prenons le temps d'une brève étude de stabilité. Soit ${}^c\mathbf{C}_{D_q}$ la matrice cinématique directe articulaire définissant l'effet de l'actionnement sur l'organe terminal :

$${}^c\boldsymbol{\tau} = {}^c\mathbf{C}_{D_q} \dot{\mathbf{q}}$$

Notons que :

- lorsque la matrice cinématique inverse articulaire ${}^c\mathbf{C}_{I_q}$ est régulière, alors ${}^c\mathbf{C}_{D_q}$ est l'inverse de ${}^c\mathbf{C}_{I_q}$;
- lorsque la matrice cinématique inverse articulaire ${}^c\mathbf{C}_{I_q}$ est singulière, alors il existe des mouvements libres de l'organe terminal. Par conséquent, ${}^c\mathbf{C}_{D_q}$ traduit la vitesse *imprédictible* de l'organe terminal *effectivement* réalisée par le mouvement des moteurs sous l'influence de tous les phénomènes mécaniques en jeu et n'a donc pas de formulation analytique.

L'effet de la commande (3.68) sur le mouvement de l'organe terminal est donc :

$${}^c\boldsymbol{\tau} = -\lambda {}^c\mathbf{C}_{D_q} \widehat{c\mathbf{C}_{I_q}} \widehat{\mathbf{M}^T}^+ \mathbf{e} \quad (3.69)$$

et sur les variations des erreurs de direction :

$$\dot{\mathbf{e}} = \begin{pmatrix} \dot{e}_1 \\ \vdots \\ \dot{e}_{N_{jambes}} \end{pmatrix} = -\lambda \mathbf{M}^T {}^c\mathbf{C}_{D_q} \widehat{c\mathbf{C}_{I_q}} \widehat{\mathbf{M}^T}^+ \mathbf{e} \quad (3.70)$$

Cette commande assure donc que les erreurs de direction seront bornées sous perturbations bornées si le produit $\mathbf{M}^T {}^c\mathbf{C}_{D_q} \widehat{c\mathbf{C}_{I_q}} \widehat{\mathbf{M}^T}^+$ est une matrice semi-définie positive. Cette condition se décompose en :

$${}^c\mathbf{C}_{D_q} \widehat{c\mathbf{C}_{I_q}} \geq 0 \quad (3.71)$$

$$\mathbf{M}^T \widehat{\mathbf{M}^T}^+ \geq 0 \quad (3.72)$$

Cela ne nous avance guère puisque l'erreur sur la sphère unité est, par définition, bornée. Alternativement, nous pouvons également écrire :

$$\widehat{\mathbf{M}}^{T+} \dot{\mathbf{e}} = -\lambda \widehat{\mathbf{M}}^{T+} \mathbf{M}^{Tc} \mathbf{C}_{Dq} \widehat{\mathbf{C}}_{Iq} \widehat{\mathbf{M}}^{T+} \mathbf{e} \quad (3.73)$$

ce qui nous montre que la commande (3.68) assure que la fonction d'erreur $\widehat{\mathbf{M}}^{T+} \mathbf{e}$ sera asymptotiquement stable si le produit $\widehat{\mathbf{M}}^{T+} \mathbf{M}^{Tc} \mathbf{C}_{Dq} \widehat{\mathbf{C}}_{Iq}$ est défini positif.

Le fait d'avoir été obligé de redescendre jusqu'aux vitesses articulaires pour définir la commande pointe du doigt une omission classique en commande référencée capteurs. En effet, on ne peut déduire de cette condition, la condition classique $\widehat{\mathbf{M}}^{T+} \mathbf{M}^T > 0$ que si le produit $\mathbf{C}_{Dq} \widehat{\mathbf{C}}_{Iq}$ est l'identité, ce qui est impossible en pratique.

Transformons alors la relation précédente en :

$$\widehat{\mathbf{C}}_{Iq} \widehat{\mathbf{M}}^{T+} \dot{\mathbf{e}} = -\lambda \widehat{\mathbf{C}}_{Iq} \widehat{\mathbf{M}}^{T+} \mathbf{M}^{Tc} \mathbf{C}_{Dq} \widehat{\mathbf{C}}_{Iq} \widehat{\mathbf{M}}^{T+} \mathbf{e} \begin{pmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{e}_{N_{jambes}} \end{pmatrix} \quad (3.74)$$

Et là, tout s'éclaire ! La commande (3.68) assure la stabilité asymptotique de la fonction d'erreur $\widehat{\mathbf{C}}_{Iq} \widehat{\mathbf{M}}^{T+} \mathbf{e}$ si le produit $\widehat{\mathbf{C}}_{Iq} \widehat{\mathbf{M}}^{T+} \mathbf{M}^{Tc} \mathbf{C}_{Dq}$ est défini positif, qui se décompose en :

$$\widehat{\mathbf{C}}_{Iq} \mathbf{C}_{Dq} > 0 \quad (3.75)$$

$$\widehat{\mathbf{M}}^{T+} \mathbf{M}^T > 0 \quad (3.76)$$

Pour illustrer cet asservissement visuel des directions référentes, nous allons traiter deux exemples réels : le cas de la plateforme de Gough-Stewart et celui du robot I4L.

Exemple 9 : Asservissement visuel des directions référentes de la plateforme de Gough-Stewart

□

□

Dans la définition de la commande (3.68), nous avons volontairement omis de préciser le point d'expression des matrices cinématiques. En général, on prend l'origine du repère organe terminal, ce qui donnerait dans le cas de la plateforme de Gough-Stewart :

$$\forall i = 1..6, \dot{q}_i = {}^{tc} \underline{\mathbf{u}}_i (\mathbf{I}_3 - [{}^c \mathbf{E} \mathbf{B}_i]_{\wedge}) {}^c \boldsymbol{\tau}_e \quad (3.77)$$

$$\forall i = 1..6, {}^c \dot{\underline{\mathbf{u}}}_i = \frac{1}{q_i} (\mathbf{I}_3 - {}^c \underline{\mathbf{u}}_i {}^{tc} \underline{\mathbf{u}}_i) (\mathbf{I}_3 - [{}^c \mathbf{E} \mathbf{B}_i]_{\wedge}) {}^c \boldsymbol{\tau}_e \quad (3.78)$$

Considérons d'abord le cas où la caméra est embarquée sur l'organe terminal. Alors, le vecteur cEB_i est une constante à étalonner. La commande dépend donc de la mesure des directions référentes, de la géométrie de la plateforme mobile et, sous forme de gains, des variables articulaires. On peut donc sans problème se débarrasser de ces dernières dans la commande, qui ne dépend alors que des directions référentes et de la géométrie de la plateforme mobile. Par rapport à l'asservissement visuel par observation de l'organe terminal, nous n'avons donc pas perdu l'indépendance aux mesures articulaires et gagné en nombre de paramètres à étalonner. En effet, la commande est indépendante de la géométrie de la base et des transformations mire/base et organe terminal/caméra.

Embarquer la caméra sur l'organe terminal n'est pas forcément simple car il faut prévoir un système de fixation qui prendra de la place sur la plateforme mobile. Cela place aussi la caméra dans une situation délicate puisqu'elle est soumise aux mouvements de l'organe terminal, ce qui peut remettre en cause la stabilité de l'image. Enfin, si l'on utilise une caméra perspective, il n'est pas certain que le champ de vision soit suffisamment large pour observer toutes les jambes.

Intéressons-nous donc au cas où la caméra est déportée et vérifions que nous conservons les mêmes propriétés sympathiques. Dans ce cas, le vecteur cEB_i s'exprime comme le produit ${}^cR_e {}^eEB_i$ de l'orientation du repère organe terminal par rapport au repère caméra et de la géométrie constante de la plateforme mobile. Il faudrait donc à partir des mesures ${}^c\underline{u}_i$ remonter à l'orientation cR_e par le biais des modèles géométriques.

Si l'on remarque qu'au final, le torseur cinématique n'est qu'un intermédiaire de calcul dans l'expression de la loi de commande, il devient tout naturel de profiter de la liberté du choix du point d'application de ce torseur. En l'occurrence, ici, nous choisissons d'exprimer le torseur cinématique de l'organe terminal en le centre du repère caméra. Alors, le modèle cinématique inverse complet devient :

$$\forall i = 1..6, \dot{q}_i = {}^{tc}\underline{u}_i (\mathbf{I}_3 - [{}^cCB_i]_{\wedge}) {}^c\tau_c \quad (3.79)$$

$$\forall i = 1..6, {}^c\underline{\dot{u}}_i = \frac{1}{q_i} (\mathbf{I}_3 - {}^c\underline{u}_i {}^{tc}\underline{u}_i) (\mathbf{I}_3 - [{}^cCB_i]_{\wedge}) {}^c\tau_c \quad (3.80)$$

où C est l'origine du repère caméra.

Nous avons donc exactement les mêmes propriétés que dans le cas embarqué si l'on peut mesurer la position des points B_i dans le repère caméra. Cela peut se faire en utilisant la constance de la géométrie entre deux images et la reconstruction des droites référentes lorsque les jambes de la plateforme sont cylindriques. Nous reviendrons sur ce calcul dans la partie dédiée à l'identification. Une alternative à la mesure des points B_i consiste à écrire :

$${}^cCB_i = {}^cCA_i + {}^cAB_i = {}^cCA_i + q_i {}^c\underline{u}_i \quad (3.81)$$



FIG. 3.11 – Dispositif expérimental pour l’asservissement visuel des jambes d’une plateforme de Gough-Stewart

où cCA_i est une constante à étalonner... et où les variables articulaires réapparaissent ! Cependant, nous avons montré [W13] qu’en approchant ces dernières par leur valeur médiane (c’est-à-dire leur valeur à mi-course de chaque jambe), la commande convergeait tout de même.

Nous avons mis en œuvre [C14, R10] l’asservissement visuel déporté des directions référentes (Figure 3.11) sur notre plateforme de Gough-Stewart pédagogique. Pour cela, nous avons de nouveau utilisé la bibliothèque ViSP [MSC05] pour l’extraction et le suivi des limbes des jambes cylindriques et les calculs matriciels. A partir des limbes extraites dans l’image, nous reconstruisons la direction à partir de (3.6) et (3.57). Les courbes d’erreur sur les directions référentes (Figure 3.12) montrent que la commande a bien l’effet découplant attendu. En revanche, ces courbes ne sont pas les belles exponentielles habituelles, car, en raison des forts frottements présents dans les articulations, nous avons mis en place une technique de gain adaptatif.

Exemple 10 : Asservissement visuel des directions référentes du robot I4L

Rappelons l’expression du modèle cinématique inverse complet du robot I4L dans le repère caméra :

$$\forall i = 1..4, \dot{q}_i = \frac{{}^{tc}\mathbf{u}_i}{{}^{tc}\mathbf{z}_i^c \mathbf{u}_i} \left(\mathbf{I}_3 \delta_i K^c \mathbf{x}_b \right) \begin{pmatrix} {}^c\mathbf{v}_e \\ \omega \end{pmatrix} \quad (3.82)$$

$$\forall i = 1..4, \dot{\mathbf{u}}_i = \frac{1}{L_i} \left(\mathbf{I}_3 - \frac{{}^c\mathbf{z}_i {}^{tc}\mathbf{u}_i}{{}^{tc}\mathbf{z}_i^c \mathbf{u}_i} \right) \left(\mathbf{I}_3 \delta_i K^c \mathbf{x}_b \right) \begin{pmatrix} {}^c\mathbf{v}_e \\ \omega \end{pmatrix} \quad (3.83)$$

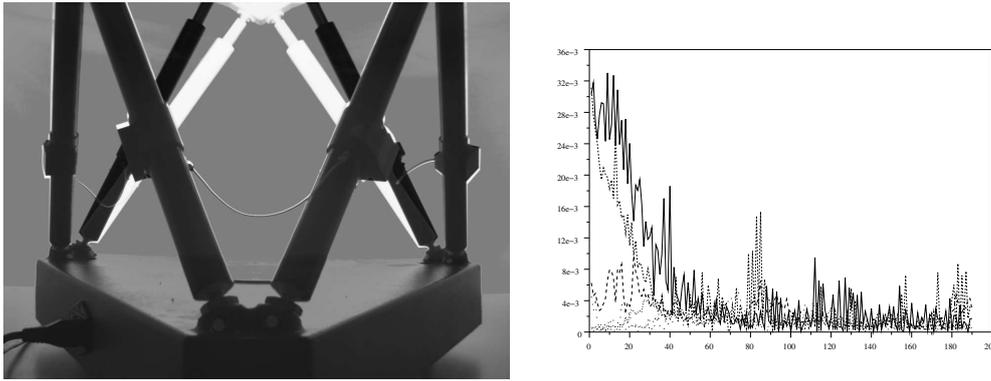


FIG. 3.12 – Composition de l'image de consigne (noir) et de l'image initiale (blanc) et courbes d'erreur (adimensionnelles) sur les directions référentes

Ce modèle ne dépend aucunement des variables articulaires, ce qui confirme notre intuition qui préfère asservir les directions référentes plutôt que les variables articulaires.

Nous avons testé, en simulation pour le moment [C120], l'asservissement visuel des directions de références dans le cas du montage existant au LIRMM et dans une configuration où les moteurs forment deux V parallèles plutôt que deux I (Figure 3.13). Les résultats d'exécution de la commande montrent qu'il y a bien convergence dans les deux cas des erreurs de directions mais qu'il n'y a convergence de l'erreur de pose que dans la configuration en V (Figures 3.14 et 3.15). Ces résultats sont parfaitement cohérents avec nos attentes, à savoir que les directions référentes du I4L sont invariantes aux translations selon \underline{x}_b et aux rotations de l'organe terminal, dans le montage à plat et qu'il est nécessaire de se rapprocher de l'image.

┌

└

Asservissement visuel des limbes d'éléments référents cylindriques

Déterminons à présent la loi de commande générique basée sur l'hypothèse que les éléments référents sont des cylindres de révolution axés sur la droite référente. Alors, il est possible d'extraire leurs limbes $({}^{im}\underline{\ell}_i^1, {}^{im}\underline{\ell}_i^2), i = 1..N_{jambes}$ de l'image.

Afin de pouvoir mettre en œuvre un asservissement visuel, il nous faut déterminer la matrice d'interaction associée à ces mesures image. Elle se décompose en la matrice Jacobienne ${}^{im}\mathbf{J}_c$ du changement de coordonnées des droites image, depuis les coordonnées normalisées aux coordonnées pixelliques, et en la matrice d'interaction ${}^c\mathbf{L}_\ell^T$ associée aux limbes d'un cylindre dans le plan image normalisé.

La première est obtenue en dérivant par rapport au temps le changement de

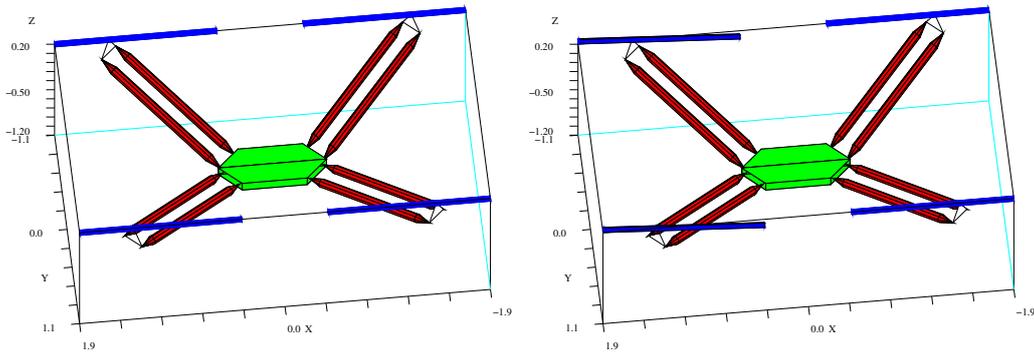


FIG. 3.13 – Configuration du I4L en I (gauche, configuration du LIRMM) et en V (droite)

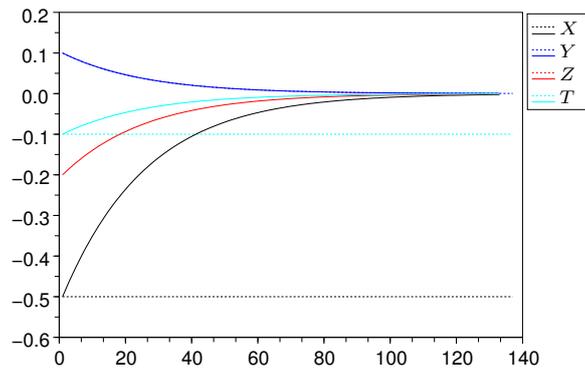
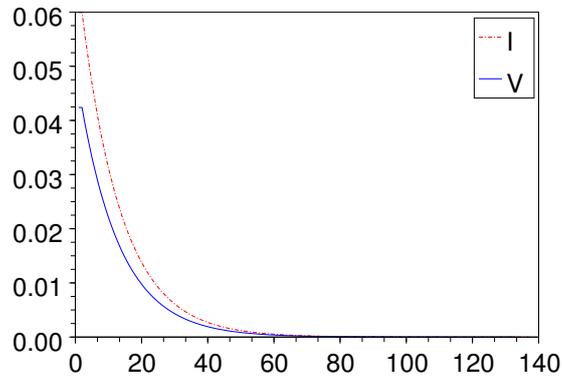


FIG. 3.14 – Comparaison de l'évolution de la norme de l'erreur sur les directions (haut) et de l'erreur sur le positionnement de l'organe terminal (bas) lors de l'asservissement visuel des directions référentes du I4L, en configuration en I (pointillés) et en V (trait plein)

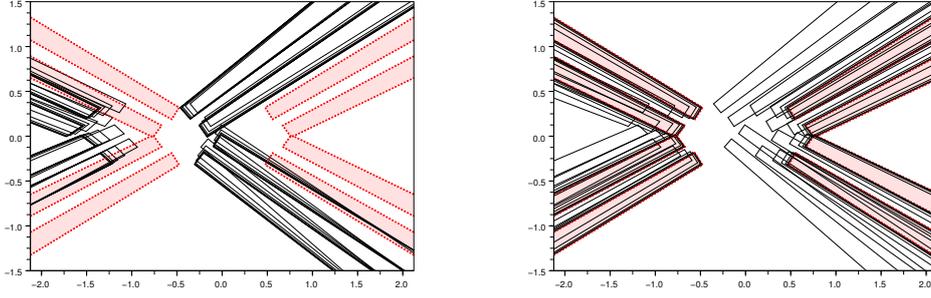


FIG. 3.15 – Comparaison de l'image dans la configuration en I (gauche) et en V (droite) lors de l'asservissement visuel des directions référentes du I4L. L'image de consigne est surimposée en rouge.

coordonnées (3.7), ce qui donne :

$${}^{im}\dot{\underline{\ell}} = {}^{im}\mathbf{J}_c^c \dot{\underline{\ell}} \quad (3.84)$$

$${}^{im}\mathbf{J}_c = \|\mathbf{}^t\mathbf{K} {}^{im}\underline{\ell}\| (\mathbf{I}_3 - {}^{im}\underline{\ell} {}^{tim}\underline{\ell}) \mathbf{}^t\mathbf{K}^{-1} \quad (3.85)$$

La seconde est un peu moins évidente à déterminer. La première façon de faire est de dériver l'expression (3.54) ou (3.55). C'est un peu fastidieux surtout quand il existe un raccourci élégant. En effet, considérons les contraintes imposées à une limbe de cylindre, c'est-à-dire que $\underline{\ell}$ est un vecteur unitaire, perpendiculaire à la direction de l'axe du cylindre, d'où :

$$(\underline{\ell} \cdot \underline{\ell}) = 1 \quad (3.86)$$

$$(\underline{\ell} \cdot \underline{\mathbf{u}}_{axe}) = 0 \quad (3.87)$$

De plus, tout point \mathbf{P} sur l'axe du cylindre vérifie (3.56) que nous rappelons ici :

$$(\underline{\ell} \cdot \mathbf{P}) = -R \quad (3.88)$$

La dérivée de ces contraintes par rapport au temps donne trois contraintes sur la dérivée de la limbe $\dot{\underline{\ell}}$:

$$\left(\dot{\underline{\ell}} \cdot \underline{\ell}\right) = 0 \quad (3.89)$$

$$\left(\dot{\underline{\ell}} \cdot \underline{\mathbf{u}}_{axe}\right) + (\underline{\ell} \cdot \dot{\underline{\mathbf{u}}}_{axe}) = 0 \quad (3.90)$$

$$\left(\dot{\underline{\ell}} \cdot \mathbf{P}\right) + (\underline{\ell} \cdot \dot{\mathbf{P}}) = 0 \quad (3.91)$$

De plus, rappelons que $(\underline{\mathbf{u}}_{axe}, \underline{\ell}, (\underline{\mathbf{u}}_{axe} \wedge \underline{\ell}))$ forme une base orthonormée sur laquelle nous pouvons exprimer les coordonnées de $\dot{\underline{\ell}}$:

$$\dot{\underline{\ell}} = \gamma_1 \underline{\mathbf{u}}_{axe} + \gamma_2 \underline{\ell} + \gamma_3 (\underline{\mathbf{u}}_{axe} \wedge \underline{\ell}) \quad (3.92)$$

D'après (3.89) et (3.90), nous avons immédiatement :

$$\gamma_1 = -(\underline{\ell} \cdot \underline{\mathbf{u}}_{axe}) = -{}^t \underline{\ell} \mathbf{C}_{I_{\underline{u}}} \tau \quad (3.93)$$

$$\gamma_2 = 0 \quad (3.94)$$

En reportant ces résultats dans (3.91), nous tirons l'expression de γ_3 :

$$\gamma_3 = \frac{{}^t \mathbf{P} \underline{\mathbf{u}} {}^t \underline{\ell} \mathbf{C}_{I_{\underline{u}}} \tau - {}^t \underline{\ell} \dot{\mathbf{P}}}{{}^t \mathbf{P} (\underline{\mathbf{u}}_{axe} \wedge \underline{\ell})} \quad (3.95)$$

Nous aboutissons donc à :

$$\underline{\dot{\ell}} = - \left(\mathbf{I}_3 - \frac{(\underline{\mathbf{u}}_{axe} \wedge \underline{\ell}) {}^t \mathbf{P}}{{}^t (\underline{\mathbf{u}}_{axe} \wedge \underline{\ell}) \mathbf{P}} \right) \underline{\mathbf{u}} {}^t \underline{\ell} \mathbf{C}_{I_{\underline{u}}} \tau - \frac{(\underline{\mathbf{u}}_{axe} \wedge \underline{\ell}) {}^t \underline{\ell}}{{}^t (\underline{\mathbf{u}}_{axe} \wedge \underline{\ell}) \mathbf{P}} \dot{\mathbf{P}} \quad (3.96)$$

Lorsque le cylindre est un élément référent d'un mécanisme parallèle, le point \mathbf{P} est animé d'un mouvement qui ne dépend que de la vitesse de l'organe terminal (variation de l'état). Par conséquent, on peut introduire une matrice cinématique inverse associée à un point de l'axe du cylindre telle que :

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{C}_{I_{\mathbf{P}}} \tau \quad (3.97)$$

Nous pouvons alors écrire l'expression finale de la matrice d'interaction associée à une limbe d'un élément référent cylindrique :

$${}^c \mathbf{L}_{\underline{\ell}}^T = - (\mathbf{\Pi}_1 \quad \mathbf{\Pi}_2) \begin{pmatrix} {}^c \mathbf{C}_{I_{\underline{u}}} \\ {}^c \mathbf{C}_{I_{\mathbf{P}}} \end{pmatrix} \quad (3.98)$$

avec

$$\mathbf{\Pi}_1 = \left(\mathbf{I}_3 - \frac{({}^c \underline{\mathbf{u}}_{axe} \wedge {}^c \underline{\ell}) {}^t \mathbf{P}}{{}^t ({}^c \underline{\mathbf{u}}_{axe} \wedge {}^c \underline{\ell}) {}^c \mathbf{P}} \right) {}^c \underline{\mathbf{u}} {}^t \underline{\ell} \quad (3.99)$$

$$\mathbf{\Pi}_2 = \frac{({}^c \underline{\mathbf{u}}_{axe} \wedge {}^c \underline{\ell}) {}^t \underline{\ell}}{{}^t ({}^c \underline{\mathbf{u}}_{axe} \wedge {}^c \underline{\ell}) {}^c \mathbf{P}} \quad (3.100)$$

L'asservissement visuel des limbes d'un robot parallèle dont les éléments référents sont des cylindres de révolution s'obtient donc en régulant les erreurs $\mathbf{e}_{ij} = \left({}^{im} \underline{\ell}_i^{j*} \wedge {}^{im} \underline{\ell}_i^j \right)$, $i = 1..N_{jambes}$, $j = 1..2$ à zéro par l'intermédiaire de la commande définie par :

$$\mathbf{N}_{i,j}^T = [{}^{im} \underline{\ell}_i^{j*}] \wedge {}^{im} \mathbf{J}_c {}^c \mathbf{L}_{\underline{\ell}_{i,j}}^T \quad (3.101)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \widehat{{}^c \mathbf{C}_{I_q}} \widehat{\mathbf{N}^T}^+ \mathbf{e} \quad (3.102)$$

où \mathbf{e} et \mathbf{N}^T sont obtenues respectivement par l'empilement des \mathbf{e}_i^j et $\mathbf{N}_{i,j}^T$ et où ${}^c \mathbf{L}_{\underline{\ell}_{i,j}}^T$ désigne la matrice d'interaction associée à la limbe $\underline{\ell}_i^j$, dans laquelle ${}^c \underline{\mathbf{u}}_i$ et ${}^c \underline{\ell}_i^j$ sont reconstruites selon (3.7) et (3.57) à partir de ${}^{im} \underline{\ell}_i^1$ et ${}^{im} \underline{\ell}_i^2$.

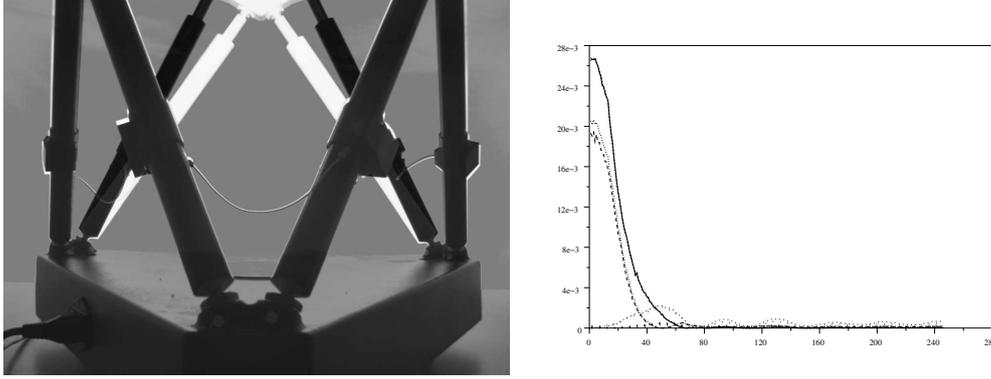


FIG. 3.16 – Composition de l'image de consigne (noir) et de l'image initiale (blanc) et courbes d'erreur (adimensionnelles) sur les limbes

Exemple 11 : Asservissement visuel des limbes de la plateforme de Gough-Stewart

Nous avons implanté cette commande dans le cas de la plateforme de Gough-Stewart [CI25, CI25] dans le même dispositif expérimental que dans le cas de l'asservissement visuel des directions référentes (Figure 3.11). Dans le cas de la plateforme de Gough, le point de l'axe choisi pour le calcul de la matrice d'interaction des limbes de chaque jambe est le point A_i d'attache de la jambe sur la base. Ce point étant fixe, quelque soit le mouvement de l'organe terminal, la matrice cinématique inverse qui lui est associée est nulle et la matrice d'interaction de chaque limbe se ramène à :

$${}^c L_{\underline{\ell}_{i,j}}^T = - \left(\mathbf{I}_3 - \frac{({}^c \underline{\mathbf{u}}_i \wedge {}^c \underline{\ell}_i^j)^{tc} \mathbf{A}_i}{t ({}^c \underline{\mathbf{u}}_i \wedge {}^c \underline{\ell}_i^j) {}^c \mathbf{A}_i} \right) {}^c \underline{\mathbf{u}}_i {}^t c \underline{\ell}_i \mathbf{C}_{I_u} \quad (3.103)$$

qui se développe en :

$${}^c L_{\underline{\ell}_{i,j}}^T = - \frac{1}{q_i} \left(\mathbf{I}_3 - \frac{({}^c \underline{\mathbf{u}}_i \wedge {}^c \underline{\ell}_i^j)^{tc} \mathbf{A}_i}{t ({}^c \underline{\mathbf{u}}_i \wedge {}^c \underline{\ell}_i^j) {}^c \mathbf{A}_i} \right) {}^c \underline{\mathbf{u}}_i {}^t c \underline{\ell}_i (\mathbf{I}_3 - [{}^c \mathbf{C} \mathbf{B}_i]_{\wedge}) \quad (3.104)$$

La Figure 3.16 montre la convergence de l'asservissement visuel des limbes. Si l'on compare (Figure 3.17) les résultats de l'asservissement visuel des directions référentes et des limbes, nous voyons sans surprise que la commande dans l'image est plus robuste au bruit que la commande dans l'espace des directions.

Cette différence est bien évidemment dûe au choix de la régulation dans un espace reconstruit ou de mesure (*cf.* asservissement visuel 3D et asservissement visuel 2D).

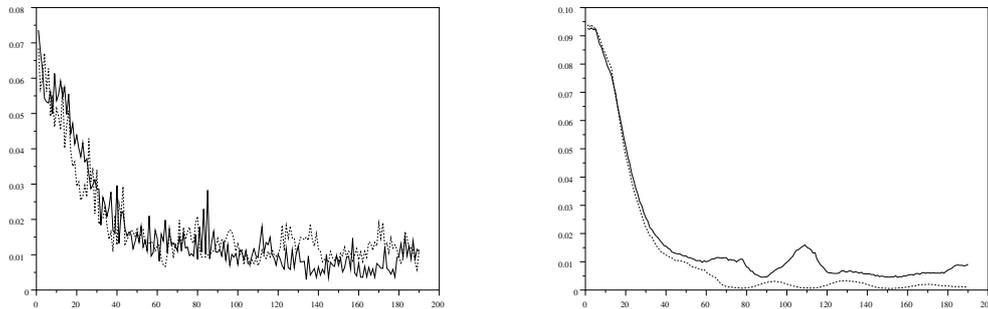


FIG. 3.17 – Comparaison de l'évolution des erreurs sur les directions référentes (gauche) et des erreurs sur les limbes (droites) dans le cas d'un asservissement visuel des directions référentes (trait plein) et d'un asservissement visuel des limbes (pointillés)

Cela dit, elle est amplifiée par le fait que l'utilisation d'une seule caméra perspective (sans distorsion optique) pour observer toutes les jambes impose de placer la caméra relativement loin des jambes, ce qui réduit l'effet perspectif sur les cylindres et donc la qualité de la reconstruction de la direction des jambes. C'est pourquoi nous voyons trois voies d'amélioration : utilisation d'une caméra à courte focale, voire une caméra oeil-de-bœuf, ce qui nécessite un suivi de limbes en présence de distorsions, utilisation d'un système multi-caméra, ou utilisation d'une caméra omnidirectionnelle placée entre les jambes du robot.

Asservissement visuel des limbes d'éléments référents en forme de parallélogrammes à grands côtés cylindriques

Lorsque l'on observe un élément référent ayant pour forme un parallélogramme (cas des dérivés du Delta) dont les grands côtés sont des cylindres de révolution, le travail est quasiment fait. En effet, il suffit de reprendre les résultats du cas des éléments référents cylindriques. Les seuls changements sont que :

- le nombre de cylindres est multiplié par deux ;
Il faut donc rajouter un indice supplémentaire pour désigner les deux cylindres du parallélogramme.
- le point \mathbf{P} utilisé dans la matrice d'interaction ${}^c\mathbf{L}_{\underline{\ell}}^T$ n'est plus sur la droite référente ;
Cependant, on peut toujours lui associer une matrice cinématique inverse et/ou l'obtenir à partir du décalage constant entre la droite référente et l'axe du grand côté.

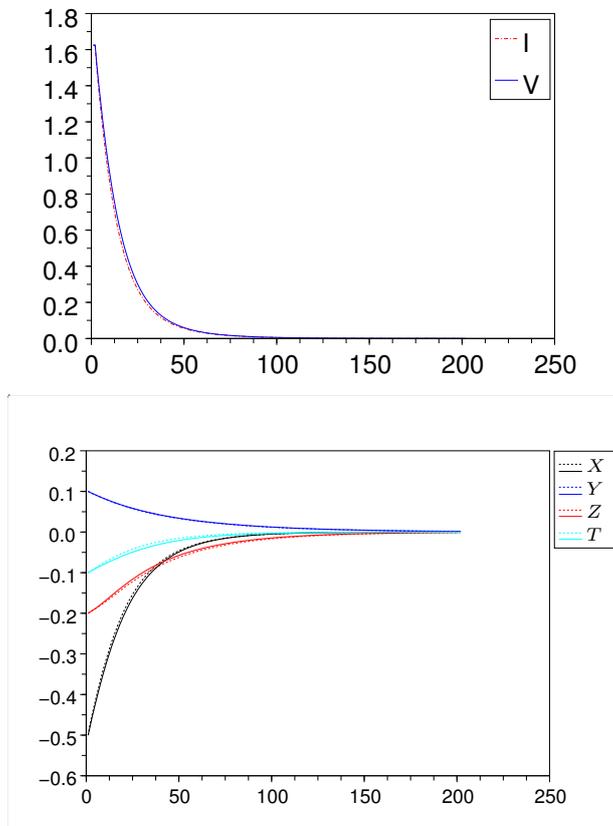


FIG. 3.18 – Comparaison de l'évolution de la norme de l'erreur sur les limbes (haut) et de l'erreur sur le positionnement de l'organe terminal (bas) lors de l'asservissement visuel des directions référentes du I4L, en configuration en I (pointillés) et en V (trait plein)

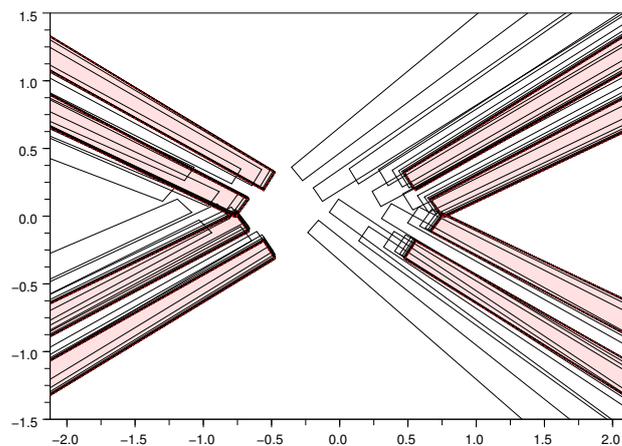


FIG. 3.19 – Evolution de l'image dans la configuration en V lors de l'asservissement visuel des limbes référentes du I4L. L'image de consigne est surimposée en rouge.

Exemple 12 : Asservissement visuel des limbes du robot I4L

Lorsque la commande proposée est appliquée au robot I4L (Figures 3.18 et 3.15), elle converge dans les deux configurations (en I et en V), contrairement à la commande sur les directions. On remarque que l'effet d'un petit désalignement des moteurs se traduit par une faible variation du comportement de la commande.

3.5 Identification

D'après tout ce qui précède, deux voies s'offrent à nous pour l'identification géométrique à partir de l'observation par vision des éléments cinématiques. La première voie consiste à exploiter cette information redondante sans présager de la commande qui sera implantée. Il s'agit donc d'un retour en arrière sur l'approche modulaire dans lequel l'observation des éléments cinématiques intervient dans une recherche d'amélioration de la précision de l'estimation des paramètres géométriques. Cette voie se décline en deux types de méthodes : l'une, plus numérique, consiste à exploiter les modèles établis en début de chapitre et se rattache à la classe des méthodes d'auto-étalonnage qui exploite justement la mesure des informations redondantes ; la seconde, plus mécanique, consiste à tirer parti des invariants des liaisons.

La deuxième voie pousse, quant elle, jusqu'au bout l'intégration entre modélisation, identification et commande, puisqu'elle consiste à estimer les paramètres intervenant dans l'asservissement visuel des éléments cinématiques.

3.5.1 Méthode numérique

A l'instar de l'identification géométrique basée sur le modèle géométrique implicite scalaire vue au chapitre précédent, nous devrions pouvoir, grâce aux informations redondantes, proposer plusieurs méthodes basées sur le modèle géométrique implicite vectoriel.

Dans un premier temps, en supposant l'observation simultanée des éléments cinématiques et de l'organe terminal et la mesure articulaire, cette méthode reviendra à remplacer une équation de contrainte scalaire en chaque configuration par trois équations de contrainte.

Dans un deuxième temps, un pas supplémentaire vers la flexibilité et la simplicité de mise en œuvre consistera à réduire les contraintes d'observation, soit en supprimant la mesure de l'organe terminal, soit en supprimant la mesure articulaire, soit les deux.

Enfin, en exploitant l'image même des éléments cinématiques, il est parfaitement envisageable d'exploiter la dualité entre identification et commande. Ainsi, il s'agirait de réguler, par actionnement virtuel des paramètres géométriques, une erreur dans chaque image acquise pour l'identification entre le signal issu de la configuration mesurée (équivalente à une consigne en commande) et le signal virtuel obtenu en projetant le modèle dans chaque image (équivalent au signal courant en commande).

Nous ne nous attarderons pas sur ce type de méthodes, qui, si elles devaient être mentionnées et devraient être efficaces, n'apportent pas de nouveauté substantielle par rapport aux concepts existants.

3.5.2 Utilisation des invariants des liaisons

Cette méthode est historiquement notre point d'entrée dans l'observation des éléments cinématiques. Elle est amplement détaillée dans [Ren03], aussi n'en rappelons-nous que le principe.

Les liaisons mécaniques réalisent des contraintes sur la pose relative de deux corps rigides et peuvent être définies par des invariants cinématiques. Par exemple, une liaison rotule est défini par son centre, point fixe du mouvement relatif et une liaison pivot ou glissière par une droite de l'espace. En plaçant les deux corps en une série de positions différentes, il est donc possible de faire apparaître ces invariants. Par exemple, des marqueurs visuels placés sur l'un des deux corps d'une liaison pivot, auront des trajectoires circulaires dans l'espace. Ces trajectoires se trouveront dans des plans parallèles et leurs centres seront alignés.

En nous plaçant dans l'hypothèse d'éléments cylindriques, une partie de ces invariants sont définis par la forme même de l'élément. En effet, nous avons vu que les limbes d'un cylindre de révolution permettent de reconstruire totalement la position (4 degrés de liberté) de l'axe de ce cylindre dans l'espace, ne laissant aux extrémités haute et basse qu'un seul degré de liberté (translation le long de l'axe). Ainsi, en plaçant le robot dans au moins deux configurations telles que l'une des extrémités est fixe, il est possible de retrouver sa position dans l'espace, qui est l'intersection des axes du cylindre associés à chacune des configurations (Figure 3.20).

Ce principe a été exploité pour proposer une méthode d'identification associée à plusieurs familles de robots :

- les robots dérivés de la plateforme de Gough-Stewart, à jambes de longueur actionnée (voire fixe) en liaison rotule ou cardan libre avec la base ou l'organe terminal, avec un nombre quelconque de jambes ($n - [U|S]P[U|S]$) ;

Les résultats de simulation sur la plateforme de Gough-Stewart [CI8, CI11] montrent que les paramètres géométriques peuvent être estimés, en plaçant la caméra en 3 positions différentes, avec une précision comprise entre 0,04 mm et 1 mm selon les paramètres. Les paramètres les plus mal estimés étant les altitudes relatives des points d'attache des vérins sur la base et sur la plateforme

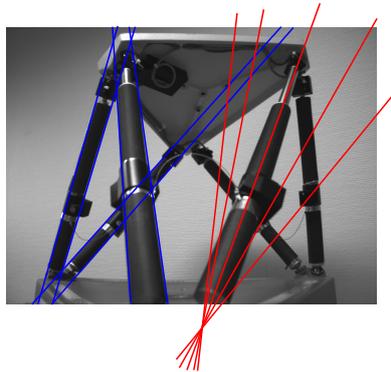


FIG. 3.20 – Principe de reconstruction d’une liaison rotule par observation des limbes des jambes cylindriques

mobile.

- les robots dérivés du Delta linéaire, à jambes en forme de parallélogramme de longueur constante en liaison libre avec d’une part l’organe terminal et d’autre part un corps en liaison glissière avec la base ;

Les résultats expérimentaux sur le robot I4L montrent une amélioration de 25% de la précision par rapport à l’identification avec une mire [RI6] et même jusqu’à 75% lorsque l’on couple les deux mesures [CI13].

- les robots dérivés du Delta, tels que le H4 ou le Par4, sur l’organe terminal desquels viennent se greffer des parallélogrammes, dont l’extrémité basse se trouve au bout d’un bras en rotation.

La méthode proposée dans [Ren03] pour ce dernier cas doit encore être validée expérimentalement.

3.5.3 Approche intégrée

L’intérêt de cette approche intégrée vient du fait que les modèles utilisés pour l’asservissement visuel des éléments cinématiques font en général appel à moins de paramètres que les modèles utilisés dans l’approche modulaire. Une bonne partie de cette réduction vient du fait que seuls des modèles différentiels sont utilisés lors de la commande et qu’aucun modèle géométrique ne l’est. De plus, comme les paramètres géométriques n’interviennent pas dans le signal régulé, leur estimation n’a pas besoin d’être extrêmement précise.

Il suffirait donc d’une précision de l’ordre de celle du modèle CAO. Cependant, les paramètres sont exprimés dans le repère de la caméra, ce qui ne nous permet pas de reprendre les paramètres CAO tels quels. Une première solution est d’estimer la transformation entre le repère caméra et le repère (base ou organe terminal) auquel il est lié. La question est de savoir comment le faire.

Une estimation manuelle pourrait suffire à condition que l'opérateur soit suffisamment expérimenté et soit capable de trouver manuellement des angles dans l'espace à quelques degrés près. L'expérience des travaux pratiques en dernière année d'école d'ingénieurs en mécanique prouve que cette condition n'est pas simple à vérifier.

Une autre solution serait de faire appel aux techniques d'étalonnage bras-ciel [RI1] et à la résolution du problème géométrique direct (eh oui! encore lui...). Enfin, on pourrait employer les méthodes d'identification du modèle générique, qui fournissent entre autres cette transformation.

De manière plus homogène, il est plus cohérent d'utiliser la caméra dans la configuration qui sera utilisée lors de la commande dès l'identification de ces paramètres géométriques dépendant de la pose relative entre la caméra et le robot. Comme cette caméra est placée de manière à observer les éléments cinématiques, nous retombons donc sur la méthode d'identification utilisant les invariants cinématiques. Cependant, celle-ci n'a pas à être menée dans sa totalité puisque nous n'avons besoin d'identifier qu'une sous-partie des paramètres géométriques.

Par exemple, pour le robot I4L, nous n'avons besoin d'identifier que les paramètres ${}^c\mathbf{z}_i$ (direction des moteurs), ${}^c\mathbf{x}_b$ (direction de translation relative des deux demi-nacelles) et éventuellement L_i (longueur des jambes). Notons que ces longueurs agissent uniquement comme des pondérations inter-jambes dans les matrices cinématiques et que leur valeur CAO est donc largement suffisante pour la commande.

De même, pour la plateforme de Gough-Stewart, les seuls paramètres géométriques à identifier sont les positions des points d'attache des vérins sur la base. Cela réduit la méthode utilisant les invariants cinématiques à la simple résolution d'un système linéaire, tiré de la contrainte (3.56) [CI17]. Cette méthode a été validée aussi bien avec une caméra perspective qu'avec une caméra omnidirectionnelle [CI28] en tirant parti du fait que les projections de droites dans une caméra omnidirectionnelle peuvent être aisément ramenées à des projections dans une caméra perspective équivalente [CI22].

Pour terminer ce paragraphe dédié à l'identification, nous noterons que dans tous les cas de mécanismes parallèles que nous connaissons, le problème d'identification géométrique semble se ramener, grâce au modèle géométrique implicite vectoriel, à un simple problème linéaire si l'on est capable de mesurer simultanément les variables articulaires, les directions des éléments référents et la pose de l'organe terminal.

3.6 Conclusion et perspectives intermédiaires

Dans ce chapitre, nous avons établi une modélisation cinématique complète décrivant aussi bien le mouvement des actionneurs que celui des articulations passives en fonction du mouvement de l'organe terminal. Pour cela, nous avons introduit la

notion d'élément référent pour chaque jambe. Il s'agit du corps autour duquel est exprimée la contrainte de fermeture de chaîne cinématique, à l'origine des modèles géométriques de la littérature. A l'inverse de l'usage courant qui déduit de cette contrainte un modèle géométrique implicite scalaire pour en déduire un modèle cinématique inverse purement articulaire à des fins de commande essentiellement articulaire (et exceptionnellement d'asservissement visuel de l'organe terminal), nous exprimons cette contrainte de manière vectorielle, ce qui requiert de pouvoir estimer la direction référente.

L'étude de la cinématique complète ainsi obtenue nous a permis d'affirmer que les directions référentes sont plus pertinentes cinématiquement que les variables articulaires habituellement choisies, quoique moins pratiques à actionner. Au passage, nous avons démontré que si les éléments référents sont liés à l'organe terminal, alors les droites référentes qui leur sont associées sont équivalentes à la pose de l'organe terminal.

Cela explique pourquoi, en pratique et sans justification formelle, tous les travaux que nous avons rencontrés expriment la contrainte de fermeture cinématique autour des corps liés à l'organe terminal.

Cela nous a surtout amenés à proposer un schéma de commande générique pour l'asservissement visuel des directions référentes, dans lesquels on observe les matrices cinématiques inverse (articulaire et redondante) plutôt que de les reconstruire à partir de la pose et du modèle géométrique implicite vectoriel (dans le meilleur des cas) ou à partir des variables articulaires et de la résolution du problème géométrique direct (dans le pire et habituel cas). Ce schéma a été validé expérimentalement sur la plateforme de Gough-Stewart.

Malheureusement, le robot I4L nous a montré que la donnée des directions référentes n'est pas toujours suffisante pour avoir l'équivalence avec la pose. Aussi avons-nous développé notre analyse cinématique au plus près de l'image pour offrir toutes les briques d'un modèle géométrique projectif, qui se traduit lorsque les éléments référents sont construits à partir de cylindres de révolution par l'expression de leurs limbes en fonction de la pose. Nous avons montré que dans ce cas d'éléments référents cylindriques, les limbes étaient équivalentes aux droites référentes, donc à la pose, donc à l'état. Nous n'avons pas formalisé ce modèle géométrique projectif car, pour la commande, seules les matrices cinématiques et d'interaction sont nécessaires. En revanche, nous avons écrit un modèle de commande générique pour les éléments référents cylindriques, qui s'étend facilement au cas des éléments référents en forme de parallélogrammes. Cet asservissement visuel des limbes a été validé expérimentalement sur la plateforme de Gough-Stewart et en simulation sur le robot I4L, ainsi que sur le robot Par4 [CI30].

Nous avons vu également que ces schémas de commande ont le grand avantage de faire appel à un paramétrage géométrique réduit par rapport aux autres types de commande de robots parallèles : commande articulaire, commande cartésienne

par mesure articulaire ou asservissement visuel 3D pose. Nous avons également entreperçu la possibilité de réaliser ces commandes sans faire appel aux mesures articulaires, confirmant ainsi la dissociation entre perception et actionnement pour les robots parallèles.

Dans des travaux antérieurs à cette modélisation intégrée, nous avons proposé, sur la base de l'observation des éléments référents, des méthodes d'identification géométrique *ad hoc* pour différentes familles de mécanismes parallèles reposant sur des mouvements spécifiques permettant de révéler des invariants cinématiques. Ces méthodes ont été validées à des niveaux divers. La méthode développée pour l'identification géométrique complète de la plateforme de Gough-Stewart a été, quant à elle, simplifiée pour se limiter à l'identification des seuls paramètres utiles pour la commande. Elle consiste alors en une simple régression linéaire.

Les perspectives qui s'ouvrent à l'issue de ce chapitre sont nombreuses. La première concerne la validation expérimentale de l'asservissement visuel des limbes sur tout type de robot parallèle ainsi que des méthodes d'identification. Toujours d'un point de vue expérimental, il sera nécessaire de faire l'évaluation des performances en termes de précision, temps de calculs, voire d'efforts internes.

D'un point de vue plus théorique, se posent également les questions, classiques en automatique, d'observabilité et de commandabilité du système. La question de l'observabilité consiste à savoir :

- quels éléments cinématiques doivent être choisis pour servir d'éléments référents ;
- quel est le nombre de limbes nécessaire à l'observation indirecte de la totalité de l'état, dans le cas des éléments référents cylindriques ;
- ou encore, quelles sont les configurations cinématiques dégénérées dans lesquelles l'observabilité est perdue.

La question de commandabilité revient essentiellement à étudier les singularités et autres minima locaux des commandes proposées.

Nous chercherons également à produire des méthodes d'asservissement visuel des limbes des robots parallèles sans capteurs articulaires, pour retomber sur les propriétés de l'asservissement visuel 3D pose tout en réduisant le nombre des paramètres géométriques et en simplifiant leur estimation. Cela nous amène à envisager la formulation d'une méthode d'identification géométrique générique basée sur l'observation des limbes, et éventuellement en l'absence de mesure articulaire. Dans l'approche intégrée suivie dans ce chapitre, nous serons également amenés lors du développement de cette méthode générique à voir s'il est possible soit de mettre à jour la commande (voire la modélisation) pour réduire les besoins en identification ou pour que cette dernière soit rendue complètement automatique.

L'observation des limbes permet de contourner les problèmes de visibilité de l'organe terminal. Néanmoins, cette observation par une caméra monoculaire peut engendrer des auto-occultations du mécanisme, qui pourront être traitées de plusieurs

manières. Les plus simples consistent en l'utilisation de plusieurs caméras ou l'appel à la vision omnidirectionnelle. Nous nous sommes déjà engagés sur cette dernière piste pour l'identification des paramètres géométriques intervenant dans l'asservissement visuel des jambes de la plateforme de Gough-Stewart. En effet, nos résultats récents en matière d'asservissement visuel omnidirectionnel de robots sériels et mobiles nous laissent penser que le couplage entre vision omnidirectionnel et asservissement visuel des limbes pourrait se faire assez simplement.

De plus, l'asservissement visuel des limbes est, finalement, une commande proprioceptive. L'utilisation d'un capteur omnidirectionnel permettrait de disposer du double aspect de la vision : proprioceptif (observation des jambes) et extéroceptif (observation de l'environnement).

Chercheur Boogie

Texte : Nikå

Inspiration : Stevie Ray Vaughan, ZZ TOP

Musique, chant, guitare, etc., etc. : Mich'L

Déjà tout petit, je m'disais
J'peux pas rester comm'ça
Les fesses par terre, le bec en l'air, dis !

Refrain :

Faut qu'ça marche, faut qu'ça marche, faut qu'ça marche !
Jusqu'à minuit, je m'disais
Bon sang
Faut qu'ça marche
Jusqu'à minuit, je m'disais
Faut qu'ça marche, faut qu'ça marche
faut qu'ça marche, faut qu'ça marche ...

Plus tard à l'école, on m'disait
Faut pas rester comm'ça
J'craignais l'pire, fallait lire, dis !

Refrain

Et au temps des filles, qui m'disait
Faut pas rêver comm'ça
Sans l'bachot, pas d'boulot, dites ?

Refrain

Puis c'est BelleIsa qui m'disait
J'peux pas rester comm'ça
Je voudrais bien de beaux gamins, dis ?

Refrain

Bernard, Philippe, ils m'disaient
Toujours des choses comme ça
Alors la science ? Est-ce qu'elle avance, dis ?

Refrain

Avec l'HDR, désormais
Ca va changer, c'est moi
Qui maint'nant aux étudiants dis :

Faut qu'ça marche ! Faut qu'ça marche !
Jusqu'à minuit, j'leur dirais
Bon sang
Faut qu'ça marche ! Faut qu'ça marche !
Faut qu'ça marche ! Faut qu'ça marche !

Chapitre 4

MICMAC dynamique classique

4.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons travaillé avec une vision cinématique du triptyque modélisation, identification et commande référencé vision. Cela supposait donc des vitesses suffisamment faibles pour pouvoir négliger les effets de l'inertie, les forces centrifuges et de Coriolis et autres phénomènes dynamiques. Si cette approche cinématique est parfaitement exploitable dans les cas où les mécanismes parallèles sont utilisés pour leur répétabilité et à des fins de positionnement précis essentiellement, elle n'est plus très utile dès lors que l'on utilise les mécanismes parallèles pour leur agilité. La principale raison à cela est que la stratégie basée sur une boucle interne, rapide, de compensation de la dynamique associée à une boucle externe, plus lente, de régulation cinématique assurant la précision n'est plus applicable. En effet, cette stratégie est appliquée avec succès aux robots sériels car ces derniers ont pour état leur configuration articulaire. En revanche, l'état d'un mécanisme parallèle est, nous l'avons vu, la pose de son organe terminal. Par conséquent, la dynamique de ce mécanisme dépend également de cette pose, et donc la compensation dynamique ne peut être effectuée de manière simple par une boucle interne travaillant au niveau articulaire.

Nous allons donc, dans ce chapitre, esquisser les premiers pas vers une version dynamique, et toujours référencée vision, du triptyque modélisation, identification et commande. C'est donc un chapitre principalement prospectif, même s'il contient un certain nombre de contributions originales dans le cas de l'observation de l'organe terminal.

4.2 Méthodologie

Nous suivrons *grosso modo* la méthodologie modulaire, en gardant cependant à l'esprit la propriété fondamentale que l'état d'un robot parallèle est la pose de son organe terminal :

- Modélisation dynamique ;
Lors de cette modélisation, plutôt que de faire l'hypothèse implicite classique que la commande sera faite par défaut dans l'espace articulaire, nous considérerons dès le départ que la commande fera appel à un capteur tridimensionnel, qui sera bien évidemment dans notre cas un système de vision rapide.
- Vision rapide ;
La prise en compte de la dynamique impose une fréquence d'échantillonnage élevée et donc une fréquence d'acquisition d'images élevée, ce qui pose des problèmes technologiques. Nous verrons comment les contourner et même comment les exploiter.
- Identification dynamique ;
Nous montrerons que, sur le papier, l'identification dynamique de robots parallèles peut être simplifiée par l'utilisation d'un capteur adéquat.
- Commande dynamique ;
Nous montrerons ici encore qu'un capteur adéquat permet de simplifier grandement la commande dynamique d'un robot parallèle, et que la commande dynamique par défaut doit se faire, comme dans le cas cinématique, dans l'espace cartésien.

4.3 Modélisation

4.3.1 Dynamique

La méthode de modélisation dynamique la plus pratique pour la commande repose sur les équations de Newton-Euler [LWP80, SLBE91] plutôt que sur les équations de Lagrange. Elle est abondamment utilisée en robotique sérielle et se traduit par une double récurrence :

récurrence avant : En partant de la base du bras manipulateur, on calcule de proche en proche les positions, vitesses et accélérations cartésiennes des corps qui le compose. Pour cela, on utilise la forme de chaque corps (plus précisément, le changement de repère que cette forme implique entre deux articulations successives) ainsi que les positions, vitesses et accélérations de toutes les articulations du bras. Cette récurrence avant est donc cinématique, car elle ne fait appel qu'à la géométrie du bras. Elle est indépendante de la répartition des masses et inerties dans les corps.

récurrance arrière : En partant de l'extrémité du bras, on calcule de proche en proche, en exploitant les résultats de la récurrence avant, les efforts qui s'appliquent sur chaque corps et par voie de conséquence de ceux qui s'exercent dans les articulations. Cette propagation à travers la chaîne cinématique fait appel à la répartition de masse dans chaque corps (masse, centre de masse, tenseur d'inertie) ainsi qu'aux caractéristiques dynamiques des articulations (inertie, flexibilité, frottements).

On obtient alors le modèle dynamique inverse de la chaîne cinématique qui est de la forme [KD99] :

$$\mathbf{\Gamma} = D_I(\mathbf{a}, \dot{\mathbf{a}}, \ddot{\mathbf{a}}, \xi_{geom}, \xi_{dyn}) \quad (4.1)$$

où $\mathbf{\Gamma}$ désigne le vecteur des efforts généralisés en les articulations \mathbf{a} , ξ_{dyn} est le vecteur des paramètres dynamiques.

Récemment, cette méthode a été étendue au cas des robots parallèles [KSG04]. Le principe de cette extension est de considérer dans un premier temps chacune des jambes comme un bras manipulateur indépendant et d'écrire son modèle dynamique inverse. Dans un deuxième temps, un bilan des efforts s'appliquant sur la plateforme est fait, à savoir la somme des efforts appliqués par chaque jambe et du torseur dynamique de la plateforme. Enfin, l'effort total au niveau de l'organe terminal est projeté sur les articulations actives.

On aboutit ainsi à un modèle dynamique inverse du robot dynamique de la forme :

$$\mathbf{\Gamma} = {}^t\mathbf{J}_r \left[\mathcal{F}_p + \sum_{i=1}^{N_{jambes}} {}^t\mathbf{J}_{P_i} {}^t\mathbf{J}_i \mathbf{H}_i \right] \quad (4.2)$$

où :

- \mathcal{F}_p désigne les efforts engendrés par la plateforme mobile sur les jambes ;
- ${}^t\mathbf{J}_r$ désigne la matrice de conversion des efforts appliqués sur l'organe terminal en les efforts appliqués dans les moteurs ;

En robotique sérielle, ce serait bien évidemment la transposée de la matrice cinématique directe ; en robotique parallèle, c'est la transposée de l'inverse de la matrice cinématique inverse articulaire, hors singularités de celle-ci.

- \mathbf{J}_{P_i} est la matrice Jacobienne des coordonnées de l'organe terminal par rapport aux coordonnées de l'extrémité de la jambe i ;

On en prend la transposée pour convertir les efforts appliqués en l'extrémité de la jambe i en les efforts appliqués en l'organe terminal.

- ${}^t\mathbf{J}_i$ est la matrice de conversion des efforts appliqués dans toutes les articulations, passives ou active, de la jambe i en les efforts appliqués en l'extrémité de cette jambe ;

C'est la transposée de ce qui est communément appelé la Jacobienne inverse de la jambe i . Comme la jambe i est un mécanisme sériel, elle possède un modèle

géométrique direct analytique et donc une matrice cinématique directe. La matrice \mathbf{J}_i est donc l'inverse de la matrice cinématique directe de la jambe i , lorsque celle-ci n'est pas singulière.

- \mathbf{H}_i est le modèle dynamique inverse de la jambe i , considérée comme isolée. Ce modèle fournit les efforts engendrés en toutes les articulations, passives ou active, de la jambe i à partir du mouvement relatif des corps qui la composent (torseurs dynamiques) et des efforts extérieurs appliqués sur chaque corps.

Il faut remarquer que ce modèle dynamique est construit de manière à permettre la commande dynamique à partir des seules informations articulaires. En explicitant les dépendances à ces mesures, nous aboutissons donc à l'expression suivante :

$$\mathbf{\Gamma} = {}^t\mathbf{C}_I(\hat{\mathbf{X}})^{-1} \left[\mathcal{F}_p(\hat{\mathbf{X}}) + \sum_{i=1}^{N_{jambes}} {}^t\mathbf{J}_{P_i} {}^t\mathbf{C}_{D_i}(\hat{\mathbf{a}}_i)^{-1} D_{I_i}(\hat{\mathbf{a}}_i, \hat{\mathbf{a}}_i, \hat{\mathbf{a}}_i, \xi_{geom}^i, \xi_{dyn}^i) \right] \quad (4.3)$$

où $\hat{\mathbf{X}} = \hat{\mathbf{X}}(\mathbf{q})$ est obtenu par résolution du problème géométrique inverse, $\hat{\mathbf{a}}_i = \hat{\mathbf{a}}_i(\hat{\mathbf{X}}(\mathbf{q}))$ est l'estimation des variables articulaires (actionnées ou non, instrumentées ou non) de chaque jambe. En pratique, il n'y a généralement qu'une articulation actionnée par jambe et c'est la seule à être instrumentée. Dans ce cas, l'estimation des variables articulaires restantes dans chaque jambe se fait à partir de l'estimée de la pose de l'organe terminal, sauf pour l'articulation active et instrumentée. Enfin, des estimations des dérivées de $\hat{\mathbf{X}}$ et des $\hat{\mathbf{a}}_i$ doivent également être disponibles, soit par dérivation numériques de $\hat{\mathbf{X}}$ et $\hat{\mathbf{a}}_i$, soit par le biais des dérivées du modèle géométrique (modèles cinématiques du premier et deuxième ordre¹). Dans tous les cas, cela nécessite l'estimation de \mathbf{X} à partir des variables articulaires \mathbf{q} .

Ainsi donc, le calcul du modèle dynamique inverse, basé uniquement sur la mesure articulaire, fait implicitement appel à la résolution du problème géométrique direct, puisqu'au final, toutes les variables de ce modèle dépendent de la pose de l'organe terminal.

En fait, il faut bien écrire le modèle dynamique inverse d'un robot parallèle sous sa forme générique dépendant de la pose et de ses dérivées :

$$\mathbf{\Gamma} = D_I(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}, \xi_{geom}, \xi_{dyn}) \quad (4.4)$$

où nous avons pris la liberté, par rapport à [IKG04] de rappeler la dépendance aux paramètres géométriques.

Par conséquent, si des mesures dans l'espace cartésien sont disponibles, il est donc très fortement probable que le calcul numérique du modèle dynamique inverse soit simplifié. En particulier, la récurrence avant dans le calcul du modèle dynamique inverse de chaque jambe doit pouvoir être remplacée par une procédure simplifiée faisant intervenir les modèles géométrique et cinématique inverses. Nous pensons

¹Et non, rappelons-le encore une fois, Jacobien et Hessien.

même, sans aucune preuve à l'heure actuelle, que la méthode en deux récurrences (avant puis arrière) doit pouvoir se simplifier en une seule récurrence arrière, les termes calculés lors de la récurrence avant pouvant probablement être calculés lors de la récurrence arrière.

4.3.2 Vision rapide

Dans le cadre d'une approche dynamique de l'identification et de la commande, il faut respecter des contraintes fréquentielles exigeantes. En effet, on ne peut plus se contenter de boucles de commande cadencées à quelques dizaines de Hertz comme dans le cas cinématique, puisqu'en pratique, les fréquences d'échantillonnage nécessaires à une commande dynamique sont voisines du millier de Hertz.

La technique habituelle employée en robotique sérielle pour prendre à la fois en compte la dynamique et la perception extéroceptive consiste à mettre en cascade deux boucles de commande [GdM03] :

- La première boucle, rapide, permet de compenser la dynamique du robot. Elle utilise pour cela le modèle dynamique inverse (4.1), qui dépend des valeurs articulaires, mesurables aisément à haute fréquence par des capteurs proprioceptifs. Cette boucle de commande interne impose de fortes contraintes temps-réel.
- La seconde boucle, plus lente, traite les données extéroceptives. C'est une commande cinématique, qui est rendue possible par la compensation de la dynamique du robot par la boucle interne. Elle est en général beaucoup moins exigeante en terme de contraintes temps-réel.

Cette technique, sur laquelle nous reviendrons, n'est pas optimale en robotique parallèle puisque la boucle de commande interne de compensation de la dynamique ne dépend plus simplement des variables articulaires mais de la pose. Il faut donc dépasser la fameuse *cadence vidéo*. Ce terme, pas très explicite, désigne en général l'acquisition d'images à 25 Hz, en deça de laquelle la fluidité apparente du mouvement dans les images est perdue pour l'œil humain et au-delà de laquelle l'œil humain ne distingue pas individuellement chaque image. Cependant, cette fréquence particulière, purement physiologique, n'a pas de sens au regard de la dynamique du robot parallèle considéré.

Le couplage entre vision et robotique parallèle au niveau dynamique requiert donc de pouvoir calculer la pose à très haute fréquence, et ce, de manière synchrone, c'est-à-dire sous de fortes contraintes temps-réel. Il n'existe pas à l'heure actuelle de produit commercial répondant à ce double besoin.

En effet, les caméras dites rapides, reposant sur la technologie CCD, peuvent être synchronisées, mais n'atteignent en général que des fréquences de l'ordre de la centaine d'images par seconde. Des fréquences plus élevées peuvent en théorie être atteintes, mais au prix d'un coût élevé [The95]. De plus, la fréquence d'acquisition

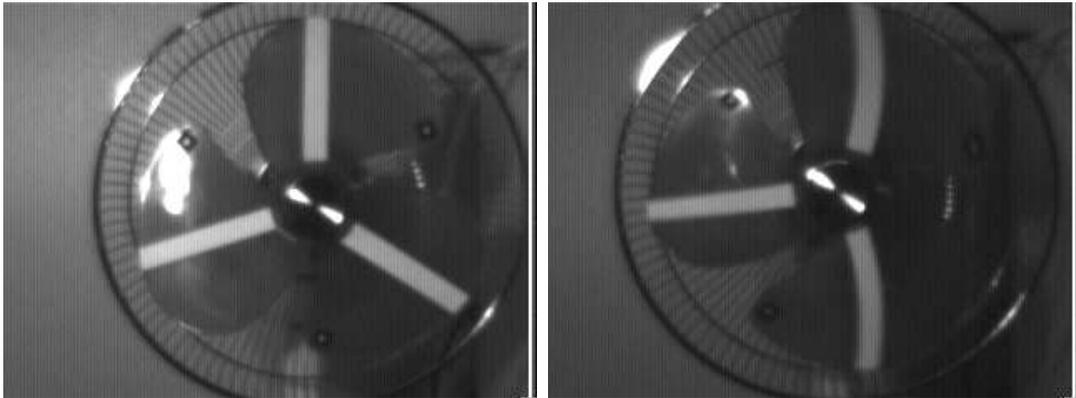


FIG. 4.1 – Un exemple de déformation optique d'un ventilateur observé par une caméra à exposition séquentielle : ventilateur à l'arrêt (gauche) et en mouvement (droite).

est limitée par le temps de transfert de l'image depuis la carte d'acquisition (caméra analogique) ou depuis la rétine elle-même (caméra numérique) vers la mémoire de l'ordinateur où elle doit être traitée.

Alternativement, l'utilisation de la technologie CMOS permet, en théorie, un accès aléatoire aux pixels de la rétine. Cela suggère donc que le goulot d'étranglement dû au transfert d'une image puisse être élargi par une lecture des seuls pixels nécessaires. Par conséquent, les caméras CMOS sont câblées de manière à permettre l'acquisition d'images (régions d'intérêt) de taille réduite par rapport à la taille totale de la rétine.

L'inconvénient de la technologie CMOS, en dehors de produits très récents, est qu'elle ne garantit pas l'exposition simultanée de tous les pixels de l'image. Il y a donc une perte de cohérence temporelle de l'image, ce qui induit des déformations optiques des objets en mouvement devant la caméra.

Ainsi, l'image d'un ventilateur observé par une *caméra à exposition séquentielle* aura des pales tordues (Figure 4.1). C'est préférable à l'image floue que fournirait une *caméra à exposition simultanée* dans les mêmes conditions expérimentales, mais ces déformations ne peuvent plus être expliquées par la simple géométrie perspective.

Les algorithmes classiques de calcul de pose sont donc pris en défaut avec de telles images et fournissent des estimations biaisées. En effet, ces algorithmes ne peuvent interpréter les déformations que par un effet purement perspectif.

Nous avons donc développé un modèle général de projection d'un objet rigide en mouvement devant une caméra à exposition séquentielle. Ce modèle, inédit jusqu'alors, permet non seulement de compenser les déformations dues au mouvement pour fournir une estimation non biaisée de la pose, mais permet également de fournir

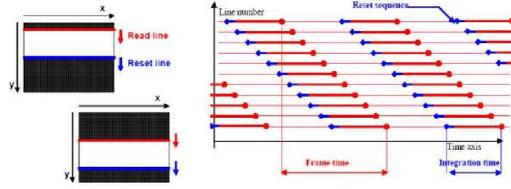


FIG. 4.2 – Chronogrammes de remise à zéro et de lecture dans une caméra à exposition séquentielle (documentation SILICON IMAGING).

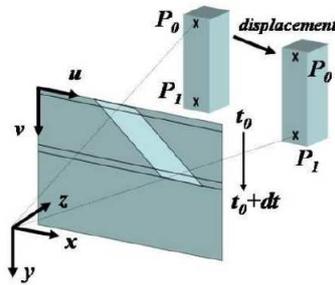


FIG. 4.3 – Projection perspective d'un objet en mouvement devant une caméra à exposition séquentielle

une estimation de la vitesse cartésienne instantanée (torseur cinématique) de l'objet au moment de l'exposition du premier pixel de l'image.

Pour cela, nous avons dû nous pencher sur le fonctionnement électronique d'une caméra à exposition séquentielle. Nous n'avons pu trouver que peu de documentation sur ce fonctionnement. A leur lecture, il semblerait que les caméras à exposition séquentielle fonctionnent sur le principe d'une acquisition ligne après ligne des pixels de l'image. En effet, une telle stratégie permet d'effectuer le transfert de l'image vers la mémoire en temps masqué par rapport à l'acquisition. Ainsi, pendant qu'une ligne de la rétine est exposée, la ligne précédente est transférée en mémoire (Figure 4.2).

De manière générale, la projection \mathbf{p} d'un point 3D \mathbf{P} est obtenue lorsque le point \mathbf{P} se trouve sur la ligne de vue définie par le pixel de l'image qui est exposé (Figure 4.3). La projection \mathbf{p} dépend donc de l'instant t où le pixel est exposé, c'est-à-dire du temps $t - t_0$ écoulé entre le début de l'acquisition de l'image et l'acquisition du pixel courant. Par ailleurs, la projection \mathbf{p} dépend de la position du point dans l'espace à cet instant, donc de la pose ${}^c\mathbf{T}_o(t)$ du repère objet par rapport à la caméra à cet instant. Cette pose dépend elle-même de la pose initiale ${}^c\mathbf{T}_o(t_0)$ ainsi que du

déplacement $\delta^o \mathbf{T}_o(t)$ du repère objet entre l'instant initial t_0 et l'instant t :

$${}^{im} \mathbf{p} \propto \mathbf{K} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{pmatrix} {}^c \mathbf{T}_o(t) {}^o \mathbf{P} \quad (4.5)$$

ou encore

$${}^{im} \mathbf{p} \propto \mathbf{K} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{pmatrix} {}^c \mathbf{T}_o(t_0) \delta^o \mathbf{T}_o(t) {}^o \mathbf{P} \quad (4.6)$$

dans lesquelles il peut falloir ajouter encore les effets de la distorsion.

Le terme $\delta^o \mathbf{T}_o(t)$ est obtenu par intégration de la vitesse cartésienne de l'objet par rapport à la caméra entre t_0 et t , c'est-à-dire pendant $\delta t = t - t_0$. Sous l'hypothèse que cette vitesse est constante, on obtient donc :

$$\delta^o \mathbf{T}_o(t) = \begin{pmatrix} \delta^o \mathbf{R}_o(t) & \delta^o \mathbf{t}_o(t) \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix} = e^{\delta t \begin{pmatrix} [{}^o \boldsymbol{\omega}]_{\wedge} & {}^o \mathbf{v}_o \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 \end{pmatrix}} \quad (4.7)$$

En décomposant la vitesse de rotation ${}^o \boldsymbol{\omega}$ en son axe ${}^o \underline{\mathbf{a}}$ et sa norme ω , on peut développer l'expression de $\delta^o \mathbf{R}_o(t)$ et $\delta^o \mathbf{t}_o(t)$ en :

$$\delta^o \mathbf{R}_o(t) = \mathbf{I}_3 + \sin \omega \delta t [{}^o \underline{\mathbf{a}}]_{\wedge} + (1 - \cos \omega \delta t) [{}^o \underline{\mathbf{a}}]_{\wedge}^2 \quad (\text{Rodrigues}) \quad (4.8)$$

$$\delta^o \mathbf{t}_o(t) = \left(\mathbf{I}_3 + \frac{(1 - \cos \omega \delta t)}{\omega \delta t} [{}^o \underline{\mathbf{a}}]_{\wedge} + (1 - \sin_c \omega \delta t) [{}^o \underline{\mathbf{a}}]_{\wedge}^2 \right) {}^o \mathbf{v}_o \delta t \quad (4.9)$$

A ce point, la question qui reste en suspens est de savoir quel temps δt s'est écoulé depuis le début de l'acquisition de l'image jusqu'à l'exposition du pixel. Pour cela, nous pouvons raisonnablement considérer que l'acquisition de l'image se fait par balayage des lignes successives. Par conséquent, nous introduisons ρ le temps qui sépare l'acquisition de deux pixels successifs sur une même ligne et κ le temps qui sépare la fin d'acquisition d'une ligne et le début d'acquisition de la ligne suivante. Alors, l'instant t , auquel le pixel (i, j) est exposé, est donné par :

$$t(i, j) = t_0 + i * \kappa + j * \rho \quad (4.10)$$

et le temps écoulé par :

$$\delta t(i, j) = i * \kappa + j * \rho \quad (4.11)$$

ou encore sous forme compacte :

$$\delta t(i, j) = \begin{pmatrix} \kappa & \rho & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \\ 1 \end{pmatrix} = (\xi_{expo} \cdot {}^{im} \mathbf{p}) \quad (4.12)$$

En développant (4.6), on voit apparaître les coordonnées du point image dans le second membre également :

$$({}^{im} \mathbf{p}) \propto \mathbf{K} \left({}^c \mathbf{R}_o(t_0) \delta^o \mathbf{R}_o((\xi_{expo} \cdot {}^{im} \mathbf{p})) \quad {}^c \mathbf{t}_o(t_0) + {}^c \mathbf{R}_o(t_0) \delta^o \mathbf{t}_o((\xi_{expo} \cdot {}^{im} \mathbf{p})) \right) {}^o \mathbf{P} \quad (4.13)$$

Ceci est dû au fait qu'il faut une coïncidence temporelle entre l'exposition effective d'un pixel et la présence du point \mathbf{P} en face de ce pixel (Figure 4.3). Cela complique quelque peu la simulation de la formation d'image, car dans ce cas, le modèle ci-dessus est interprété comme ayant les coordonnées image pour seules inconnues. En revanche, cela ne pose pas de problème particulier pour l'estimation de la pose et de la vitesse, puisque dans ce cas, les coordonnées image sont mesurées.

Le modèle ci-dessus est fortement non linéaire en les paramètres de vitesse mais peut être légèrement simplifié si l'on suppose que les vitesses de rotation ne sont pas trop élevées. En effet, le mouvement effectué par l'objet depuis le début de l'acquisition de l'image jusqu'à l'acquisition du pixel (i, j) peut être approché au premier ordre par :

$$\delta^o \mathbf{R}_o(t(i, j)) \approx \mathbf{I}_3 + \delta t(i, j) [{}^o \boldsymbol{\omega}]_{\wedge} \quad (4.14)$$

$$\delta^o \mathbf{t}_o(t(i, j)) \approx {}^o \mathbf{v}_o \delta t(i, j) \quad (4.15)$$

Sous cette approximation et sous les hypothèses que la caméra est étalonnée et que tous les pixels d'une même ligne sont exposés simultanément ($\kappa = 0$), nous avons proposé une méthode de résolution de (4.13) par ajustement de faisceaux à partir de 6 correspondances 2D-3D de points en configuration spatiale quelconque [CI19].

Cette méthode a ensuite été étendue dans deux directions. La première consiste en le traitement du cas où l'objet observé est plan. Dans ce cas, l'association de l'approximation au premier ordre et de la condition de coplanarité nous a amené à une solution linéaire du problème pouvant servir d'initialisation à des méthodes non-linéaires plus complexes et plus précises [CI23].

La seconde extension a été de relâcher l'approximation au premier ordre, pour pouvoir prendre en compte des mouvements de rotation importants dans l'image. Pour cela, nous avons considéré l'expression exacte de la rotation écoulée $\delta^o \mathbf{R}_o(t(i, j))$. En revanche, afin de réduire le couplage entre les inconnues, nous avons conservé l'approximation au premier ordre de la translation écoulée $\delta^o \mathbf{t}_o(t(i, j))$. Dans ces conditions, nous avons proposé [CI23] une méthode par ajustement de faisceaux, toujours à partir de 6 correspondances 2D-3D de points en configuration spatiale quelconque, qui s'est avérée très précise.

En effet, nous avons mis en place plusieurs dispositifs expérimentaux de validation de l'algorithme. Dans le premier, un objet 3D était contraint à se déplacer sur un rail rectiligne (Figure 4.4). Dans le second, ce même objet a été mis en rotation autour d'un axe fixe (Figure 4.5). Cela nous a permis de valider qualitativement notre méthode (Figure 4.6) puisque le mouvement rectiligne et le mouvement de rotation sont bien reconstruits, avec un écart à la trajectoire de l'ordre de 0.1 mm et 0.1 degré (Tableau 4.1). De plus, les erreurs de reprojection sont de l'ordre de 0.1 pixel, aussi bien sur une image de l'objet statique que sur des images de l'objet en mouvement.

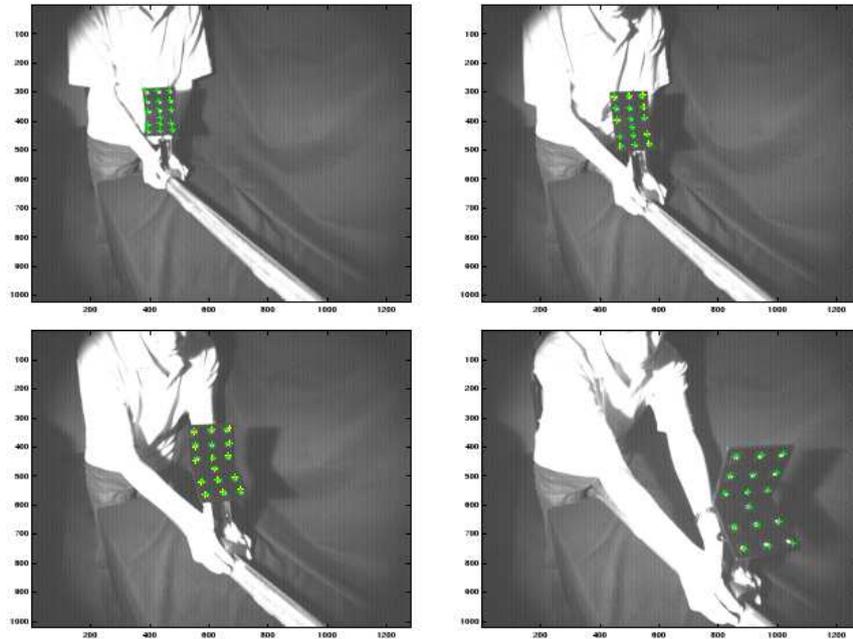


FIG. 4.4 – Quelques images prises lors d'un mouvement rectiligne

Image	1	2	3	4	5	6	7
Ecart latéral (cm)							
Algo. classique	0,00	0,19	0,15	1,38	3,00	4,54	0,00
Nouvel algo.	0,28	0,34	0,26	0,32	0,32	0,11	0,10
Ecart angulaire (deg.)							
Algo. classique	0,00	2,05	4,52	6,93	6,69	3,39	0,30
Nouvel algo.	0,17	0,13	0,17	0,34	1,09	0,91	0,40

TAB. 4.1 – Ecart latéral et angulaire à la trajectoire rectiligne idéale reliant la première et dernière image

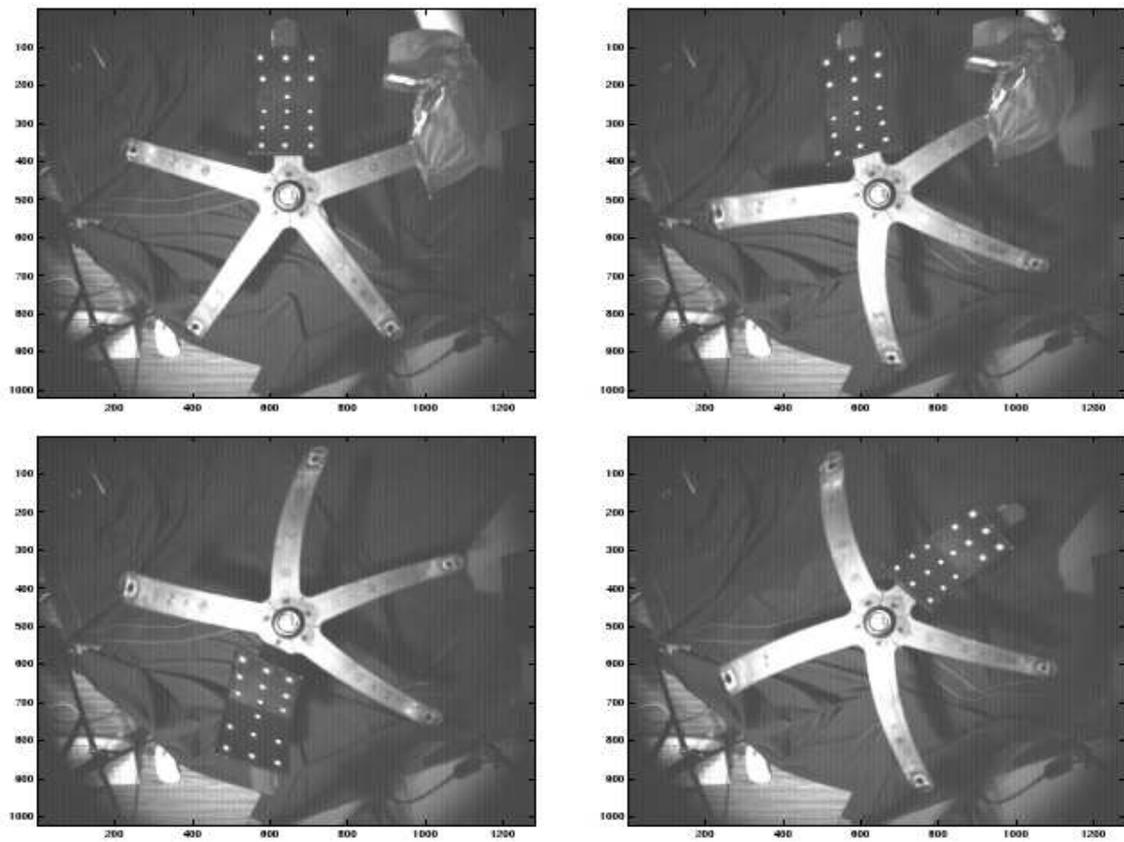


FIG. 4.5 – Quelques images prises lors d'un mouvement de rotation

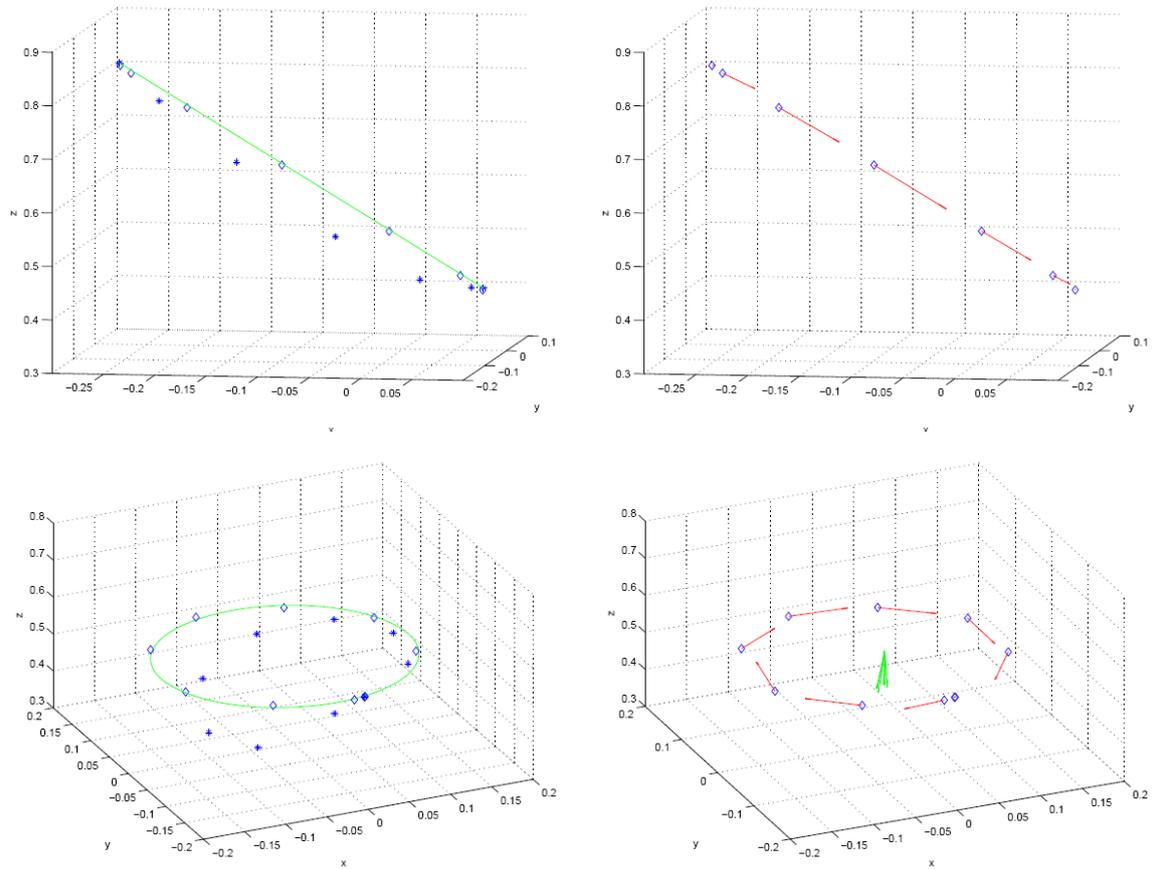


FIG. 4.6 – Reconstruction des poses (gauche) et vitesses (droite) de l'objet pour un déplacement rectiligne (haut) et en rotation (bas). Les étoiles représentent les poses estimées par un ajustement de faisceaux classique.

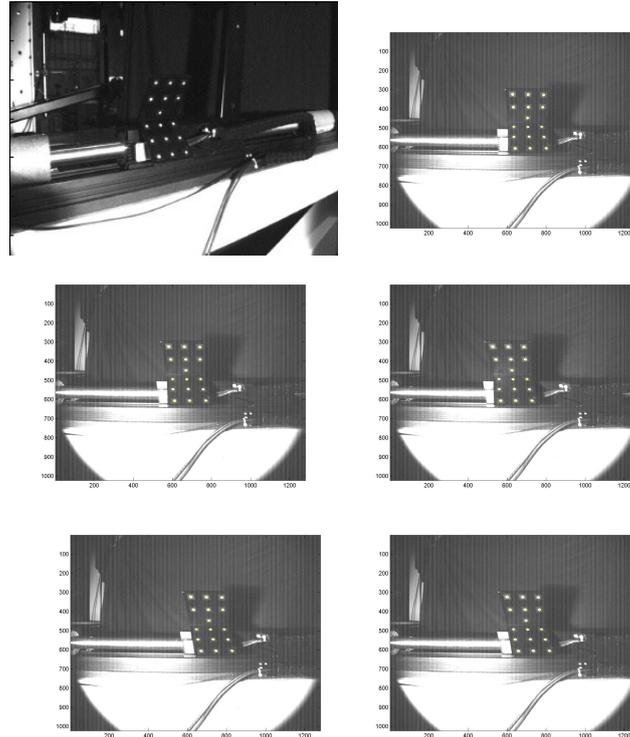


FIG. 4.7 – Dispositif pour l'évaluation de la mesure de vitesse et images prises à plusieurs vitesses

Image	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Règle optique	0.000	0.120	0.240	0.360	0.470	0.600	0.720	0.840	0.960	1.080	1.200
Vision	0.040	0.131	0.240	0.363	0.480	0.605	0.721	0.850	0.960	1.072	1.190

TAB. 4.2 – Vitesses mesurées (m/s) par la règle optique du moteur et par vision

Dans un second temps, nous avons placé l'objet sur un moteur linéaire (Figure 4.7) que nous avons déplacé à plusieurs paliers de vitesse. La comparaison entre vitesse mesurée par vision et vitesse mesurée par la règle micrométrique avec une fréquence de 1 kHz donne une erreur d'estimation d'environ 1% (Tableau 4.2).

4.4 Commande dynamique

De nouveau, nous allons repartir du schéma de commande dynamique en robotique sérielle, pour montrer comment il se convertit lors qu'on l'applique tel quel à un robot parallèle. Puis nous arriverons progressivement à une proposition de schéma de commande dynamique référencée vision de robot parallèle, dont nous verrons qu'il est le dual du schéma de commande dynamique articulaire d'un robot sériel.

Nous nous restreindrons à la commande en couple calculé [KD99], qui est la

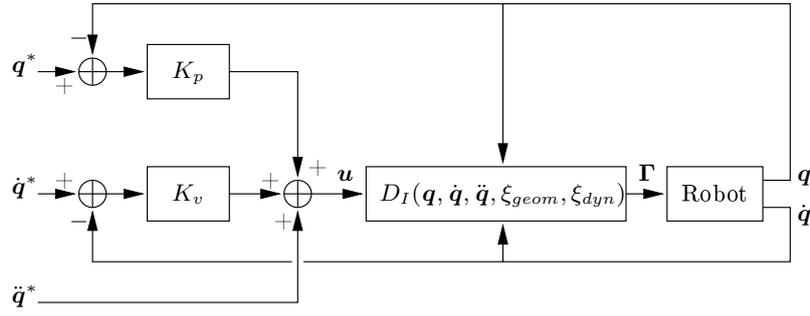


FIG. 4.8 – Commande en couple calculé dans l'espace articulaire pour un robot sériel

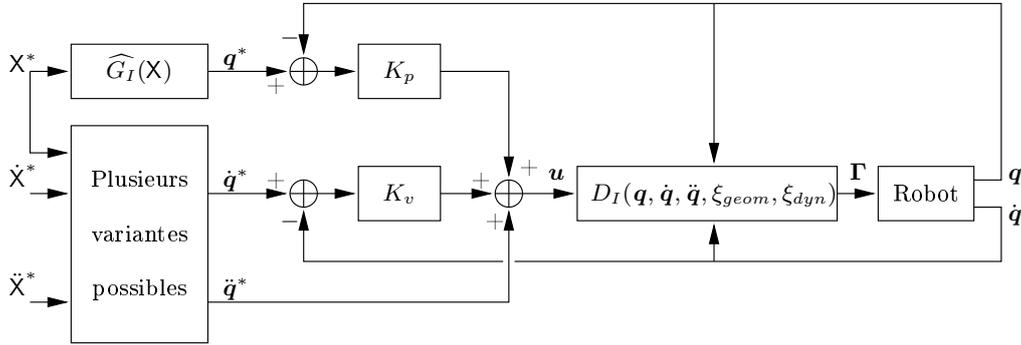


FIG. 4.9 – Commande en couple calculé dans l'espace articulaire pour un robot sériel avec référence cartésienne

méthode de commande dynamique qui exploite au maximum la connaissance mécanique du robot. En effet, elle repose sur le modèle dynamique inverse, qui fournit des efforts dans les moteurs en fonction d'un état dynamique courant.

4.4.1 Commande dynamique en robotique sérielle

Dans l'espace articulaire

A partir du modèle dynamique inverse d'un robot sériel (4.1), il est très simple d'établir une loi de commande en couple calculé (Figure 4.8) en remplaçant le terme d'accélération articulaire du modèle dynamique inverse par la pseudo-commande :

$$\mathbf{u} = \ddot{\mathbf{q}}^* + K_p(\mathbf{q}^* - \mathbf{q}) + K_v(\dot{\mathbf{q}}^* - \dot{\mathbf{q}}) \quad (4.16)$$

On fait dans cette synthèse de commande l'hypothèse que le modèle dynamique inverse est parfaitement identifié [KD99], ce qui justifie les travaux d'identification géométrique et dynamique.

Remarquons que, dans ce schéma, la trajectoire de référence est fournie dans l'espace articulaire, ce qui pose le problème de son apprentissage. On peut alternati-

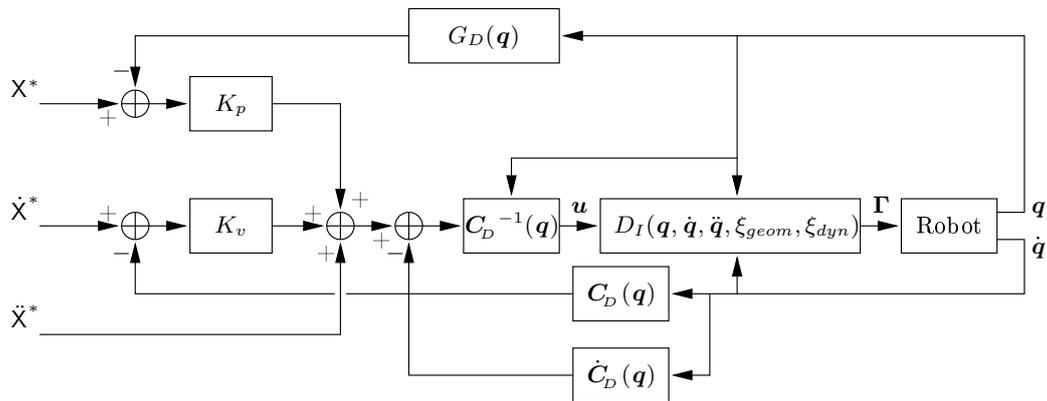


FIG. 4.10 – Commande en couple calculé dans l'espace cartésien pour un robot sériel

vement définir la trajectoire de référence dans l'espace cartésien (Figure 4.9). Dans ce cas, il faut donc résoudre le problème géométrique inverse en chaque point de la trajectoire de référence. Il s'agit ici d'une résolution au sens large du problème géométrique inverse puisqu'il faut en toute rigueur s'assurer de la continuité C^2 de la trajectoire articulaire obtenue, ce qui peut s'avérer complexe [TK06]. Heureusement, cette conversion peut être effectuée avant la commande, sans contrainte temps-réel.

Dans l'espace cartésien

Plutôt que de convertir la trajectoire de référence cartésienne en une trajectoire de référence articulaire, on peut écrire une loi de commande directement dans l'espace cartésien. Cela complique singulièrement le schéma de commande (Figure 4.10) puisque l'on voit apparaître le modèle géométrique direct, l'inverse du modèle cinématique direct et la dérivée de ce dernier (modèle cinématique direct du deuxième ordre).

L'intérêt de cette commande est limité puisqu'elle requiert de lourds calculs sous des contraintes temps-réel fortes et que la pose courante est estimée par modèle. Il est donc préférable de faire la commande dynamique d'un robot sériel dans l'espace articulaire, qui est moins gourmande en calcul à la volée et pour laquelle on peut prendre le temps nécessaire pour convertir la trajectoire de référence cartésienne en une trajectoire de référence articulaire satisfaisante.

Par vision

La commande en couple calculé dans l'espace articulaire est rapide mais manque de précision, ou plutôt a une précision qui découle de celle obtenue dans la résolution du problème géométrique inverse. La commande en couple calculé dans l'espace cartésien est plus lente mais a, elle, la précision du modèle géométrique direct. C'est

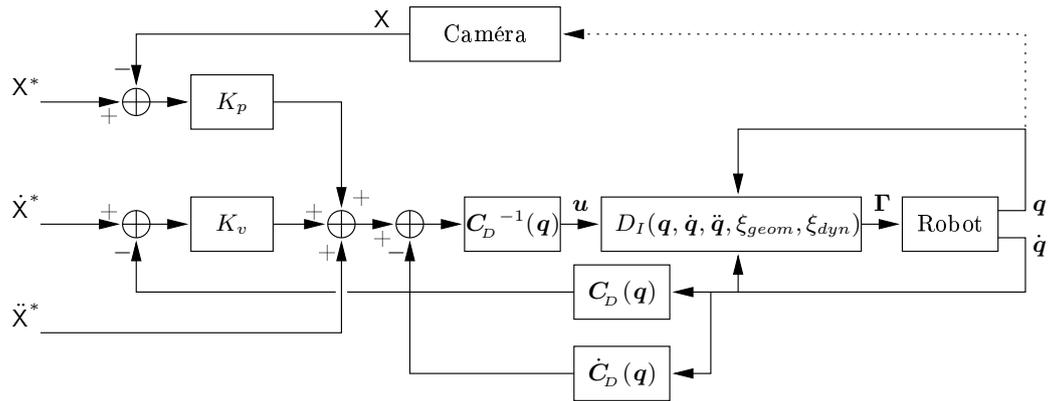


FIG. 4.11 – Commande en couple calculé dans l'espace cartésien pour un robot sériel avec estimation de la pose par vision

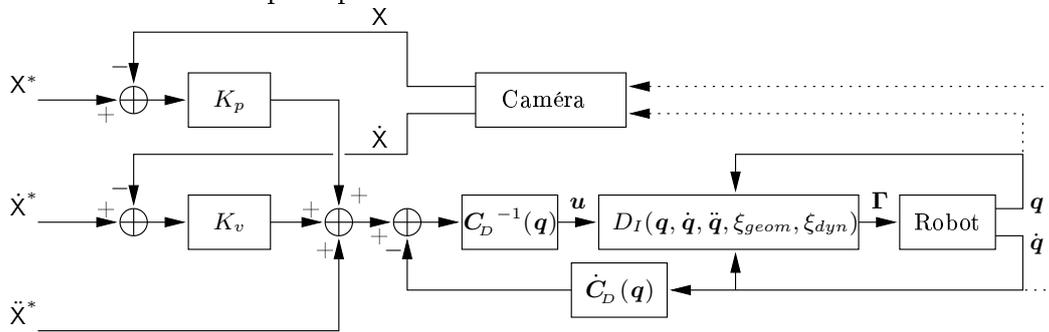


FIG. 4.12 – Commande en couple calculé dans l'espace cartésien pour un robot sériel avec estimation de la pose et de la vitesse cartésienne par vision

mieux que dans le cas articulaire, mais ce n'est pas encore forcément très bon si l'on ne passe pas beaucoup de temps à l'identification géométrique et au réglage mécanique.

Pour augmenter la précision, on peut, ainsi qu'en cinématique, faire appel à la vision. Pour cela, la stratégie classique se repose sur la simplicité et l'efficacité de la commande par couple calculé dans l'espace articulaire pour mettre en place une boucle interne de compensation de la dynamique du robot et la compléter par une boucle externe référencée vision [GdM03].

Puisque nous disposons d'une caméra rapide, nous pourrions envisager d'inclure la perception visuelle dans la boucle de commande en couple calculé soit en ne mesurant que la pose (Figure 4.11) soit en mesurant la pose et la vitesse cartésienne de l'organe terminal (Figure 4.12). En soi, cela n'apporte pas forcément beaucoup en pratique par rapport à la stratégie classique tant que l'exploitation de l'information visuelle ne peut se faire à une cadence proche du kHz. Néanmoins, cette cadence est désormais à portée de main. Alors, nous pourrions fusionner les deux boucles actuelles en la seule boucle proposée ici. Mais revenons à nos moutons !

4.4.2 Commande dynamique en robotique parallèle

La question est maintenant de savoir si les schémas de commande dynamique ci-dessus se transposent bien dans le cas parallèle. Repartons dans l'ordre habituel : commande articulaire, puis cartésienne puis référencée vision. Le lecteur pressé ira, directement au dernier schéma, sans perdre de temps sur les discussions, pourtant édifiantes, des inconvénients des deux premiers schémas.

Dans l'espace articulaire

La commande en couple calculé dans l'espace articulaire d'un robot parallèle n'est, en termes de loi de commande, pas plus compliquée que dans le cas sériel : il suffit de remplacer le terme en accélération articulaire du modèle dynamique inverse par le signal de commande. En revanche, en termes d'implantation, c'est beaucoup plus complexe (Figure 4.13 ou Figure 4.14) puisqu'il faut reconstruire tous les termes du modèle dynamique inverse (4.3) à partir des seules mesures sur les moteurs. On voit donc réapparaître l'incontournable problème géométrique direct, affligé de ses deux dérivées (modèles cinématiques directs du premier et deuxième ordre) qui peuvent être remplacés par les modèles cinématiques inverses du premier et deuxième ordre, définis analytiquement mais fonctions de la pose estimée !

De plus, cette commande n'est pas robuste, puisque comme dans le cas cinématique, une perturbation n'affectera pas le suivi de la référence articulaire, mais pourra aboutir au suivi d'une trajectoire cartésienne erronée.

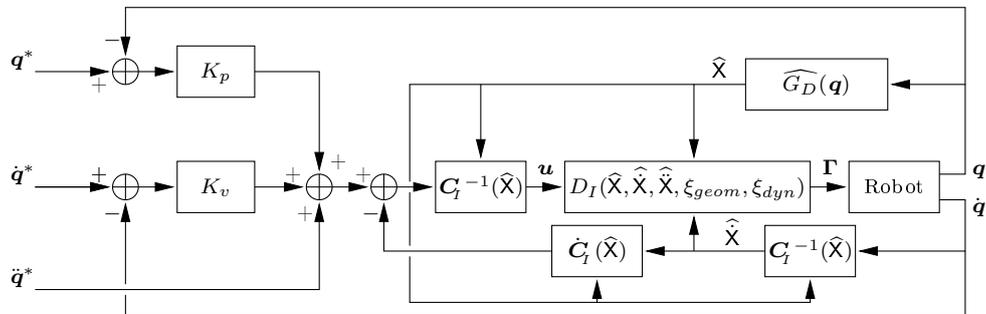


FIG. 4.13 – Commande en couple calculé dans l'espace articulaire pour un robot parallèle

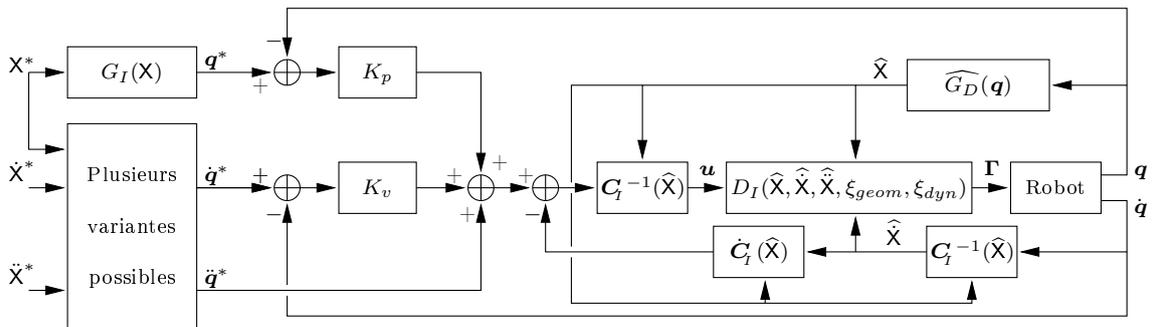


FIG. 4.14 – Commande en couple calculé dans l'espace articulaire pour un robot parallèle avec référence cartésienne

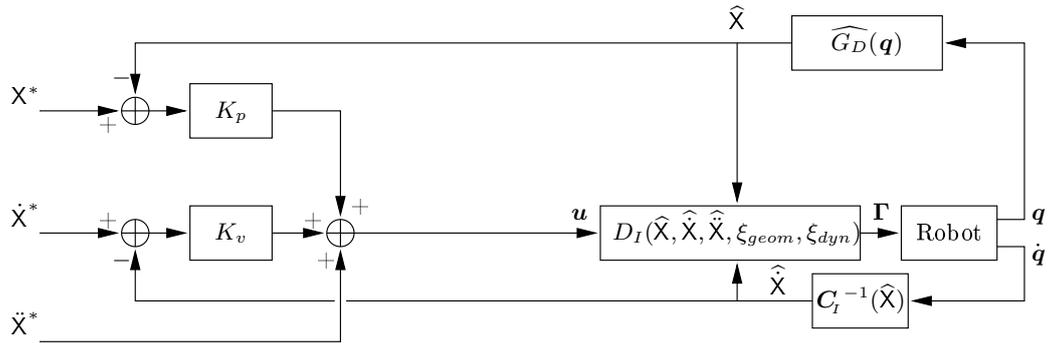


FIG. 4.15 – Commande en couple calculé dans l'espace cartésien pour un robot parallèle

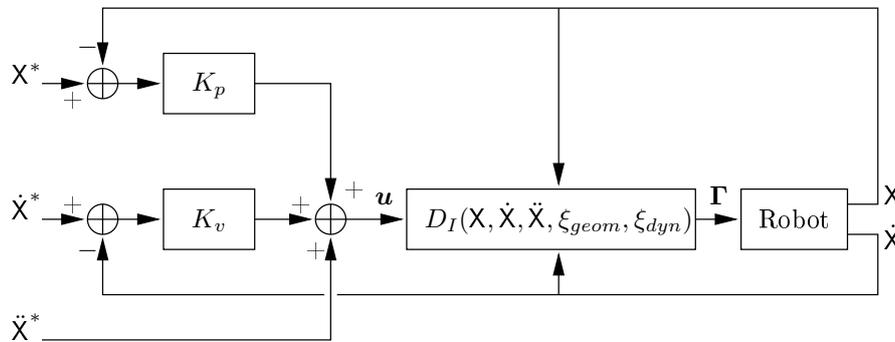


FIG. 4.16 – Commande en couple calculé dans l'espace cartésien pour un robot parallèle avec estimation de la pose et de la vitesse cartésienne par vision

Dans l'espace cartésien

La commande en couple calculé dans l'espace cartésien apporte de petites simplifications (Figure 4.15), puisque l'on voit disparaître le modèle cinématique du deuxième ordre et la conversion de la trajectoire de référence cartésienne en référence articulaire par le modèle géométrique inverse. Néanmoins, cela n'est pas suffisant puisque le problème géométrique direct reste à résoudre en temps-réel, ce qui est toujours aussi limitant en temps et précision.

Par vision

En revanche, l'utilisation d'un capteur extéroceptif mesurant à la fois la pose et la vitesse de l'organe terminal d'un robot parallèle à la cadence désirée (Figure 4.16) amènerait :

- précision : la mesure est faite dans l'espace de la tâche et la commande dans l'espace de mesure, qui est l'espace d'état ;

- rapidité : le modèle dynamique inverse est calculé dans l'espace d'état ;
- dualité : ce schéma de commande est l'identique du schéma de commande dynamique dans l'espace articulaire d'un robot sériel, la conversion de trajectoire de référence en moins.

On ne pouvait rêver de schéma de commande dynamique plus simple, ce qui nous amène à formuler une dernière proposition :

Proposition 11 (Proposition prédictive)

Toute tâche de suivi de trajectoire dans l'espace cartésien sera idéalement réalisée par un mécanisme parallèle commandé par un système de mesure extéroceptif.

En effet, la commande en couple calculé se fera alors par suivi d'une trajectoire de référence exprimée dans un espace de mesure, qui sera également l'espace d'état du système commandé.

Dans cet ordre d'idée, nous avons démarré [CI26] l'étude du couplage entre une caméra rapide à exposition séquentielle et la commande en couple calculé. Cette étude est menée sur le robot Isoglide4-T3R1 [Gog04], qui possède une cinématique extrêmement simple, en l'absence de défauts géométriques. Dans une simulation préliminaire, nous avons comparé les performances de la commande en couple calculé, cadencée à 1 kHz, dans trois cas de figure [CI29] :

- utilisation des codeurs articulaires (précis au micron), erreurs dimensionnelles de 1% au maximum sur les paramètres du modèle géométrique, et de manière assez simpliste, pas de prise en compte de flexibilité des corps, ni de défauts géométriques (parallélisme, perpendicularité) des axes ;
- utilisation d'une caméra à exposition séquentielle cadencée à 1 kHz, avec une erreur de 0,1 mm et 0,1 degré sur l'estimation de la pose et de 10% sur celle de la vitesse ;
- même cas de figure, avec une cadence de 100 Hz et un maintien (bloqueur d'ordre zéro) de la mesure par vision.

Dans les 3 cas, des erreurs de 10% au maximum sur les paramètres du modèle dynamique inverse sont introduites. Dans le premier cas de figure, les erreurs de suivi sont de l'ordre de 0,05 mm et 0,22 degré avec un biais de 7 mm et 0,5 degré. Dans le deuxième cas de figure, les erreurs de suivi atteignent 0,26 mm et 0,07 degré, sans biais notable (Figure 4.17). Enfin, dans le troisième cas de figure, les erreurs de suivi montent à 3,6 mm et 1 degré (Figure 4.18).

Il faut noter que le premier cas de figure est idéalement favorable à la commande référencée modèle et qu'en réalité les performances de cette dernière devrait se dégrader par rapport à la simulation.

En effet, les erreurs simulées sur le mécanisme sont très probablement en dessous de la réalité, puisque seules des erreurs de dimensions ont été simulées sur la base du modèle CAO idéal. Ainsi, aucune erreur n'a été introduite sur les conditions de

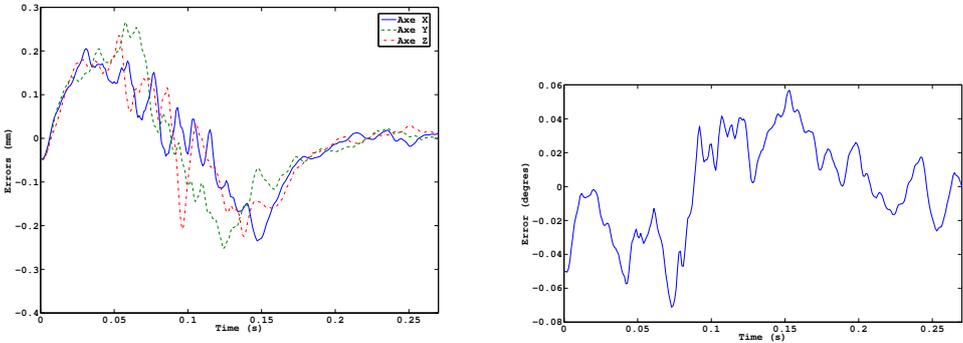


FIG. 4.17 – Erreur de suivi avec une caméra à 1 kHz

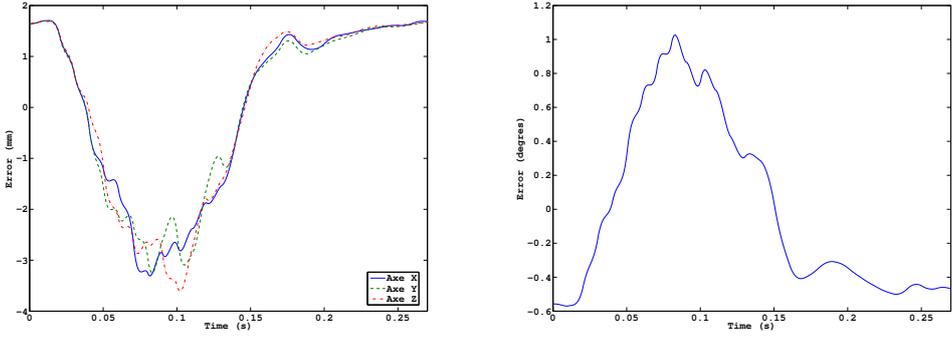


FIG. 4.18 – Erreur de suivi avec une caméra à 100 Hz

perpendicularité ou de parallélisme des liaisons, actives ou non. Nous n'avons pas non plus simulé de déformations des corps, supposés infiniment rigides. Toutes ces erreurs sont invisibles du modèle CAO et seront très difficilement compensables par la commande référencée modèle.

De plus, la cinématique particulière du robot Isoglide4-T3R1 le rend plus apte à la commande articulaire que la plupart des mécanismes parallèles. En effet, il est conçu pour que son modèle géométrique soit l'identité, ce qui supprime toute difficulté dans la résolution du problème géométrique direct. Sur un robot parallèle plus complexe, la commande référencée modèle sera donc forcément moins performante, tant en termes de temps de calcul qu'en termes de précision numérique.

En revanche, les deux autres cas de figure sont plutôt défavorablement simulés, puisque les précisions simulées du capteur sont des bornes supérieures pessimistes des mesures réelles issues de l'algorithme présenté ci-dessus. Elles seront donc amenées à s'améliorer d'une part par les progrès technologiques constants et d'autre part par l'affinement des algorithmes d'estimation de pose et vitesse. De plus, l'utilisation d'un bloqueur d'ordre zéro est une méthode très frustrante pour compenser le sous-échantillonnage de la mesure par rapport à l'actionnement et ne peut qu'être améliorée par des techniques à base d'observateurs. De plus, les erreurs de mesures optiques sont indépendantes des effets mécaniques dans le mécanisme. Aussi les performances de la commande référencée vision ne devraient pas se dégrader dans le cas de robots plus complexes et plus réalistes que celui que nous avons simulé dans ces premiers résultats.

Enfin, le rapport entre l'erreur de suivi et l'erreur de la mesure est de l'ordre de 50 dans le premier cas alors qu'il est seulement de 2 dans le deuxième cas. Cela suggère donc une plus grande robustesse aux erreurs de mesure et de modèle de la part de la commande référencée vision par rapport à la commande référencée modèle. Ces résultats de simulation sont donc très prometteurs et devraient être rapidement confrontés à la réalité expérimentale.

4.5 Identification

La commande par couple calculé repose sur l'hypothèse que le modèle dynamique inverse utilisé pour la commande représente parfaitement la dynamique réelle (compensation exacte des non-linéarités). Cela suppose donc une phase d'identification des paramètres de ce modèle, même si nous supposons qu'une commande par couple calculé référencée vision devrait être assez robuste aux erreurs sur ces paramètres.

Pour identifier le comportement dynamique de robots parallèles, nous avons le choix entre deux grandes classes de méthodes d'identification.

La première classe est issue de l'automatique linéaire. Les méthodes de cette classe (méthode de la variable instrumentale, méthodes stochastiques dérivées de

l'identification de modèle ARX, méthode des sous-espaces) sont très performantes sur des systèmes pouvant être approchés par des fonctions de transfert, éventuellement d'ordre élevé. Cependant, elles ne peuvent pas prendre en compte le caractère fortement non-linéaire d'un mécanisme poly-articulé sur l'ensemble de son espace de travail.

Alternativement, la seconde classe tire parti de la modélisation physique du système considéré. Dans cette seconde classe, on introduit plus de connaissance dans l'identification, mais on ne prend pas en compte le caractère échantillonné des variables temporelles. Cependant, ce type de méthode donne des résultats très probants sur bon nombre de systèmes mécatroniques [GP01a] si l'on prend garde à l'utilisation d'une fréquence d'échantillonnage suffisamment élevée, à l'implantation temps-réel et au filtrage correct des variables.

Le choix de la méthode d'identification dépend bien sûr de l'objectif que l'on se fixe : par exemple, la caractérisation des modes propres d'un robot parallèle et la commande dynamique n'ont pas les mêmes attentes et n'utilisent pas les mêmes modèles.

Dans le cas de la commande en couple calculé, il faut donc identifier les paramètres physiques intervenant dans le modèle dynamique inverse. Ce modèle dépend non linéairement des variables temporelles, non linéairement des paramètres géométriques du robot mais linéairement des paramètres inertiels (tenseurs et moments d'inertie) et de la plupart des types de frottements.

On peut donc réécrire, dans le cas sériel, le modèle dynamique inverse sous la forme suivante :

$$\Gamma = \mathbf{W}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \xi_{geom})\xi_{dyn} \quad (4.17)$$

L'identification dynamique se ramène alors, après identification géométrique et acquisition synchrone des valeurs articulaires et des couples moteurs, à la résolution au moindres carrés d'un système linéaire sur-contraint [MOK84, KK85].

Dans le cas parallèle, le modèle dynamique inverse a les mêmes propriétés de linéarité par rapport aux paramètres inertiels et de frottements. En revanche, nous avons vu qu'il est défini, non pas en les dérivées successives des variables articulaires, mais en les dérivées successives de la pose. Nous suggérons donc l'écriture suivante :

$$\Gamma = \mathbf{W}(X, \dot{X}, \ddot{X}, \xi_{geom})\xi_{dyn} \quad (4.18)$$

Ainsi, si l'on dispose d'un capteur extéroceptif adéquat, l'identification dynamique d'un robot parallèle devient relativement simple. En revanche, en l'absence de capteur extéroceptif adéquat, cette écriture ne peut être exploitée et force est de se ramener à un système de la forme :

$$\Gamma = \mathbf{W}(\hat{X}(\mathbf{q}), \hat{\dot{X}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \hat{\ddot{X}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}), \xi_{geom})\xi_{dyn} \quad (4.19)$$

Lorsque l'on sait que la solution aux moindres carrés d'un système linéaire n'est optimale que dans le cas d'un régresseur déterministe et de bruit additifs gaussiens sur le second membre du système, il vaut mieux éviter une telle formulation qui ne peut qu'apporter énormément de perturbations dans le régresseur et donc de biais sur les paramètres estimés. Une solution référencée vision devrait donc au contraire être plus proche des hypothèses d'optimalité de la solution aux moindres carrés.

Par ailleurs, la reconstruction des accélérations cartésiennes à partir des accélérations articulaires, elle-mêmes obtenues par double dérivation numérique des positions articulaires, peut poser des problèmes numériques. Aussi est-il préconisé [Viv04] d'introduire des capteurs de positions et accéléromètres dans le mécanisme, rejoignant ainsi le cadre de la redondance métrologique. Rappelons que cette solution impose alors d'introduire de nouveaux paramètres géométriques permettant de recalibrer les données monodimensionnelles dans des repères *ad hoc* liés à la cinématique du robot.

Notons que dans le cas traité dans [Viv04], un accéléromètre triaxial et un capteur angulaire sont placés directement sur l'organe terminal du robot H4, donnant accès non pas à une simple mesure redondante mais à une mesure partielle de l'état du robot et de ses dérivées. C'est donc une méthode hybride entre identification basée sur les mesures proprioceptives et identification basée sur les mesures extéroceptives.

4.6 Conclusion et perspectives intermédiaires

Dans ce chapitre, nous avons vu que le modèle dynamique inverse d'un robot parallèle doit s'écrire en fonction de l'état dynamique du robot (pose et vitesse cartésienne de l'organe terminal). A partir de là, nous avons proposé une méthode performante pour mesurer cet état dynamique par vision grâce à la transformation d'un défaut intrinsèque des caméras à exposition séquentielle en une propriété intéressante. La mesure de l'état dynamique d'un robot parallèle a ensuite été exploitée pour montrer, à l'issue d'une lecture et formalisation nouvelles des schémas de commande dynamique en robotique sérielle et parallèle, que le couple mécanisme parallèle – vision rapide fournissait un optimum de la réalisation de tâches robotiques cartésiennes. Pour cela, nous avons montré que la dualité cinématique entre le couple mécanisme sériel – capteurs articulaires et le couple mécanisme parallèle – vision s'étendait au niveau dynamique. Enfin, nous avons posé les bases d'un cadre formel pour l'identification dynamique de robots parallèles par vision rapide, tiré de cette dualité étendue.

A l'exception de notre contribution en matière de vision rapide, ce chapitre a été essentiellement prospectif. Aussi, même si les autres contributions ont été prouvées d'un point de vue conceptuel, il nous reste encore à les valider par la pratique, car nous n'oublions pas que la robotique est une science expérimentale.

Toutefois, ce chapitre n'a traité de la dynamique que dans une approche plutôt

classique. Il vient donc compléter le chapitre traitant de l'approche modulaire du tryptique modélisation, identification, commande cinématiques référencées vision, en apportant la même préconisation : la commande de robots parallèles doit se faire par mesure extéroceptive et les capteurs articulaires sont inutiles. C'est donc une rupture importante avec la culture robotique dominante que nous provoquons ici, révélant ainsi une nouvelle branche dans l'évolution de la robotique.

C'est également une nouvelle branche de la vision par ordinateur que nous avons mis à jour par l'exploitation des caméras à exposition séquentielle. Avec ces caméras, il ne sera plus question de géométrie projective mais plutôt de géométrie différentielle projective, qui est, à notre connaissance, un champ vierge de recherche.

Enfin, les travaux d'identification dynamique menés au LIRMM utilisant les notions de redondance métrologique, nous confirment dans l'idée qu'il existe également un complément dynamique au chapitre dédié à l'approche intégrée du tryptique modélisation, identification, commande cinématiques référencées vision.

Chapitre 5

Conclusions et perspectives

L'objectif de ce chapitre n'est pas de paraphraser les conclusions et perspectives intermédiaires énoncées en fin de chacun des chapitres précédents, mais plutôt d'en extraire les éléments permettant d'avoir une vision globale de ce qu'est ou devrait être ou devenir la commande des robots parallèles.

5.1 Conclusions

Dans ce document, nous avons longuement parcouru le tryptique « modélisation, identification, commande » au cœur de la robotique. Ce parcours a été suivi avec pour objectif d'aboutir à une vision plus nette de l'application de ce tryptique aux robots parallèles. Un autre objectif de ce parcours était de voir si la vision artificielle pouvait être aussi bénéfique aux robots parallèles qu'elle l'est aux robots sériels et mobiles. Nos attentes ont été largement dépassées puisqu'au terme de ce parcours, nous sommes désormais convaincus que la robotique parallèle et la vision artificielle sont indissociables !

En effet, nous avons rappelé, voire reformulé, les principaux schémas de commande, tant en cinématique qu'en dynamique, qui existent en robotique manipulatrice, tant sérielle que parallèle. Nous avons complété cette liste par les schémas manquants : essentiellement, ceux traitant de la commande de robots parallèles par vision. Ce document expose donc, dans un formalisme unique, l'ensemble des schémas de commande (articulaire, cartésienne ou référencée vision) de la robotique manipulatrice.

Pour aboutir à ce résultat, nous avons dû repartir de l'étape de modélisation, que nous avons, là encore, essayé de formuler de manière homogène, tant pour la robotique sérielle que parallèle, en cinématique comme en dynamique. Nous avons essayé de conserver également cette homogénéité dans la modélisation de la vision artificielle.

Un résultat fondamental de notre étude de la modélisation des robots manipulateurs est que l'état statique d'un mécanisme parallèle est la pose de son effecteur et que son état dynamique est le couple composé de la pose et de sa dérivée. En cela, les mécanismes parallèles sont d'une certaine manière duaux des mécanismes sériels dont l'état statique est le vecteur des variables articulaires et l'état dynamique est le couple formé du vecteur des variables articulaires et du vecteur des vitesses articulaires.

Au terme de ce document, deux approches se distinguent pour la modélisation, l'identification et la commande des robots parallèles par vision. La première, plus mûre car plus classique, consiste à associer un système de perception extéroceptif constitué d'une caméra et d'une mire au robot parallèle. Le montage de ce système peut être tel que la caméra est embarquée sur l'effecteur du robot et la cible est fixe par rapport à la base ou l'inverse. Dans cette approche, l'état du robot parallèle est directement observé par le système de perception. Cela nous a donc permis de formuler l'asservissement visuel 3D pose d'un robot parallèle comme une commande par retour d'état non-linéaire. De manière plus prospective et suite à notre proposition d'une méthode de mesure instantanée de l'état dynamique par vision rapide à exposition séquentielle, nous avons proposé un schéma de commande dynamique référencée vision rapide, qui est l'exacte transposition du schéma de commande dynamique articulaire d'un robot sériel.

Par conséquent, nous en concluons qu'un robot sériel est idéalement dédié à la réalisation de tâches robotiques définies directement dans son espace articulaire (et non converties depuis l'espace cartésien) et qu'un robot parallèle muni d'un capteur extéroceptif est idéalement dédié à la réalisation de tâches robotiques exprimées dans l'espace cartésien.

La seconde approche, plus originale mais moins développée, consiste à observer indirectement l'état d'un mécanisme parallèle dans la configuration de ses jambes. Nous avons montré, dans cette approche, qu'il fallait dissocier l'actionnement de la perception proprioceptive : les articulations motorisées ne doivent pas nécessairement être instrumentées, les mesures proprioceptives pertinentes peuvent être trouvées dans des articulations passives.

En pratique, nous pensons que, globalement, le choix de l'actionnement est correctement fait pour les robots parallèles existant, puisque les moteurs sont placés sur des articulations facilement motorisables (glissières, pivots). En revanche, nous estimons que leur mesure proprioceptive est mal choisie. En effet, la mesure pertinente se loge dans les éléments cinématiques liés à l'effecteur (et plus précisément

dans les droites référentes qui leur sont associées), ce qui n'est technologiquement pas simple à obtenir avec des capteurs angulaires classiques.

En revanche, nous avons montré que, dans le cas cinématique, la vision artificielle permet une telle mesure, de surcroît homogène et cohérente pour toutes les jambes, sans difficulté particulière de mise en œuvre. Nous avons ainsi fourni tous les composants nécessaires à l'écriture d'un modèle projectif de la cinématique d'un robot parallèle. Sur la base de ce modèle projectif, nous avons aussi proposé des lois de commande cinématique par observation des jambes des robots parallèles.

Cette deuxième approche est beaucoup plus intégrée que la première puisque la perception fournit directement les informations nécessaires au calcul des matrices cinématiques et d'interaction utilisées dans la commande alors que dans la première approche ces informations devaient être extraites de modèles géométriques.

La première approche repose donc sur une mesure directe de l'état et une reconstruction de la cinématique et la seconde sur une mesure directe de la cinématique et une mesure indirecte de l'état.

Ces deux approches s'opposent (ou se complètent ?) dans leur application. En effet, la première approche suppose l'observabilité de la pose relative de l'effecteur par rapport à la cible, information extéroceptive, quand la seconde approche repose sur l'observabilité des jambes, information proprioceptive.

Elle s'opposent également sur le plan de l'identification : la première approche requiert l'identification de tous les paramètres géométriques et externes associés au robot et au système de perception, quand la seconde approche ne requiert que l'identification des paramètres, en nombre restreint, intervenant dans les modèles différentiels.

En revanche, les deux approches semblent se rejoindre sur un point de rupture fort avec la robotique sérielle : les capteurs articulaires sont inutiles en robotique parallèle.

5.2 Perspectives

Au niveau le plus conceptuel, la boucle est bouclée pour la première approche, puisque nous avons posé tous les jalons aboutissant à une commande dynamique précise de robots parallèles grâce à la vision rapide. Cependant, à un niveau de détail plus fin, il reste encore de grands pans à explorer.

Dans un premier temps, il faudra approfondir la modélisation dynamique des robots parallèles sous l'hypothèse de la seule observation de l'état dynamique. L'objectif de ce travail est d'aboutir à un algorithme formel de constitution d'un tel modèle qui soit le pendant de l'algorithme de référence de Luh, Walker et Paul pour la constitution du modèle dynamique des robots sériels.

Dans un second temps, il faudra développer des algorithmes d'identification géo-

métrique et dynamique qui fonctionnent sans avoir recours à une mesure géométrique dans les articulations, afin d'atteindre une réalisation pratique ambitieuse : un robot parallèle uniquement commandé par vision.

A cette réalisation pratique seront forcément associées des demandes en termes de performances. Une piste de recherche consistera donc à développer des systèmes (matériels et logiciels) permettant une mesure toujours plus précise et rapide de l'état dynamique. Bien entendu, nous préconisons des systèmes optiques, pour garder les propriétés de la mesure sans contact, sans mécanisme interne, pour garder de bonnes propriétés métrologiques et de rapidité, avec des traitements d'images au plus près du capteur (capteur intelligent), pour augmenter la bande passante. En revanche, il n'est pas certain que la vision monoculaire dans le spectre visible soit la panacée : à quand un système multioculaire laser intelligent ?

Cela nous ramène aux caméras à exposition séquentielle, dont nous avons montré qu'elles permettaient le calcul de pose et de vitesse cartésienne d'un objet connu. Ce résultat n'est au final que la transposition du calcul de pose en vision par ordinateur, qui ne représente qu'une infime partie de ce domaine. Quasiment tout ce domaine peut être étudié à nouveau à l'aune de l'exposition séquentielle : pourra-t-on parler de géométrie projective différentielle ? En effet, nous imaginons des travaux en géométrie multi-vues à exposition séquentielle, en détection et suivi de primitive en exposition séquentielle, pour ne pas entrer dans les détails.

La seconde approche ouvre assurément autant de pistes de recherche. En effet, à court terme, les schémas de commande cinématique proposés doivent encore être validés par la confrontation avec divers types de robots parallèles réels. L'identification des paramètres intervenant dans ces commandes reste à être formalisée de manière générique. On pourra également chercher à quantifier les résultats de convergence, que les théorèmes de stabilité se contentent de qualifier, par le recours à l'analyse par intervalles.

Par ailleurs, les résultats proposés en vision monoculaire peuvent se heurter à des auto-occultations des jambes, aussi l'exploitation de la vision omnidirectionnelle dans cette approche n'est pas à négliger. L'extension de la méthode vers des éléments référents de forme quelconque pourra également être envisagée.

On pourra également envisager la conception d'un robot optimisé pour la commande par observation d'éléments référents. Cette piste est dans la veine de la conception des robots parallèles à structure de mesure découplée de la structure d'actionnement, mais devrait permettre une simplification mécanique puisque la structure de mesure pourra être supprimée. Un tel robot aurait un avantage sur un robot parallèle commandé par observation de son effecteur : les jambes d'un robot parallèle sont souvent entourées d'un carter de protection dans lequel il est possible de placer un système de vision à l'abri de projections de matière et dans des conditions d'éclairage maîtrisées.

A plus long terme, cette vision cinématique de la seconde approche ne manquera

pas d'être étendue vers la dynamique. Nous rejoindrons (ou exploiterons ou complèterons) alors les résultats de modélisation dynamique par observation de l'état. Nous devons aussi être capable de suivre les limbes à des fréquences élevées. Peut-être devrons-nous pour cela faire appel à des caméras omnidirectionnelles à exposition séquentielle ? Les vitesses élevées, associées à une recherche constante de l'économie d'énergie et donc de légèreté des jambes, engendreront assurément des déformations de ces dernières, qu'il faudra pouvoir prendre en compte dans la commande : modélisation, identification et perception seront de nouveau de la partie.

Par ailleurs, à l'instar de ce que nous avons observé dans le cas particulier de l'identification géométrique du robot I4L, plutôt que d'opposer les deux approches, nous pouvons espérer que leur exploitation conjointe (observation simultanée de l'effecteur et des jambes) permettra une amélioration flagrante des performances, tant au niveau cinématique que dynamique.

Enfin, la présentation délibérément orientée vers le « tout vision » que nous avons adoptée n'appelle pas à la substitution des méthodes existantes les méthodes proposées ici. En effet, même s'il est naturel d'opposer les approches référencées modèles aux approches référencées capteurs, pour en souligner les différences, il sera probablement fructueux de les combiner. Ainsi, on pourra profiter des propriétés de la mesure extéroceptive (plus globale et plus proche de la tâche à réaliser) et de celles de la mesure proprioceptive (plus rapide et plus précise localement) pour faire un pas de plus vers l'efficacité. Cela pourra se faire de plusieurs manières : fusion de modèles ou fusion de commandes, par exemple.

Pour terminer sur une ouverture vers le reste de la robotique, le travail présenté ici pourra être confronté à la coopération multi-bras, à la manipulation dextre ou à la robotique bipède. En effet, toutes ces tâches comportent des phases dans lesquelles des chaînes cinématiques sont fermées et où il faut garantir, outre le maintien de la fermeture des chaînes, la minimisation des efforts internes dus à la redondance d'actionnement. De manière encore plus large, nous pensons que ces travaux peuvent alimenter la conception mécatronique d'une dimension nouvelle, où les schémas de commande les plus avancés sont pris en compte le plus tôt possible dans la conception, et engendrer une évolution de l'orientation « conception mécatronique » de l'IFMA. Enfin, nous espérons pouvoir tirer de tout ce MICMAC une expérience exploitable pour faire en sorte que le terme « machines complexes » de cette activité ne désigne pas uniquement des robots parallèles.

Bibliographie

- [Ame84] American Society for Photogrammetry. *Manual of Photogrammetry*, 4th edition, 1984.
- [And99] N. Andreff. *Asservissement visuel à partir de droites et étalonnage pince-caméra*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, November 1999.
- [Ang97] J. Angeles. *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems*. Springer-Verlag, New York, 1997.
- [BA98] L. Baron and J. Angeles. The on-line direct kinematics of parallel manipulators under joint-sensor redundancy. *Advances in Robot Kinematics*, pages 126–137, 29 juin-4 juillet 1998.
- [BA00a] L. Baron and J. Angeles. The direct kinematics of parallel manipulators under joint-sensor redundancy. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(1) :1–8, février 2000.
- [BK99] S. Besnard and W. Khalil. Calibration of parallel robots using two inclinometers. In *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference On Robotics and Automation*, pages 1758–1763, Detroit, Michigan, 1999.
- [BK01] S. Besnard and W. Khalil. Identifiable parameters for parallel robots kinematic calibration. In *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2859–2866, Seoul, Korea, 2001.
- [BM91] J.H. Borm and C.H. Menq. Determination of optimal measurement configurations for robot calibration based on observability measure. *The International Journal of Robotics Research*, 10(1) :51–63, 1991.
- [CC003] *Int. Journal of Robotics Research – Special Issue on Visual Servoing*, 22(10/11), October 2003.
- [Cha98b] F. Chaumette. Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing. In *In D. Kriegman, G. Hager, A.S. Morse, editeurs, the Confluence of Vision and Control*, pages 66–78, 1998.
- [Cla91b] Reymond Clavel. *Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté*. PhD thesis, EPFL, Lausanne, 1991.
- [CMC06] A.I. Comport, E. Marchand, and F. Chaumette. Kinematic sets for real-time robust articulated object tracking. *Image and Vision Computing, IVC*, 2006.

- [CW98] D. Chablat and P. Wenger. Working modes and aspects in fully-parallel manipulators. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1964–1969, Leuven, Belgique, 1998.
- [Dan99] D. Daney. Self calibration of Gough platform using leg mobility constraints. In *World Congress on the theory of machine and mechanisms*, pages 104–109, Oulu, Finland, 1999.
- [Dan02] D. Daney. Optimal measurement configurations for Gough platform calibration. In *Int. Conf. Robotics and Automation*, pages 147–152, Washington DC, 2002.
- [DC00] T. Drummond and R. Cipolla. Real-time tracking of multiple articulated structures in multiple views. In *Proceedings of 6th European Conference on Computer Vision (ECCV'00*, volume 2, page 2036, Dublin, Eire, June-July 2000.
- [DD95a] D. DeMenthon and L. Davis. Model-based object pose in 25 lines of code. *Int. Journal on Computer Vision*, 15(1/2) :123–141, June 1995.
- [DH55] J. Denavit and R. S. Hartenberg. A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices. *Transaction of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, 22 :215–221, 1955.
- [Die98] P. Dietmaier. The Stewart-Gough platform of general geometry can have 40 real postures. In J. Lenarčič and M. L. Husty, editors, *Advances in Robot Kinematics : Analysis and Control*, pages 1–10. Kluwer, 1998.
- [DM98] B. Dasgupta and T.S. Mruthyunjaya. Force redundancy in parallel manipulators : theoretical and practical issues. *Mech. Mach. Theory*, 33(6) :727–742, 1998.
- [DP90] M.R. Driels and U.S. Pathre. Significance of observation strategy on the design of robot calibration experiments. *Journal of Robotic Systems*, 7(2) :197–223, 1990.
- [DPN04] D. Daney, Y. Papegay, and A. Neumaier. Interval methods for certification of the kinematic calibration of parallel robots. In *IEEE ICRA*, pages 147–152, April-May 2004.
- [Fau93] O. Faugeras. *Three-Dimensional Computer Vision - A Geometric Viewpoint*. Artificial intelligence. The MIT Press, Cambridge, MA, 1993. ISBN 0-262-06158-9.
- [GA90] C. Gosselin and J. Angeles. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(3) :281–290, juin 1990.

- [GCB97] G. Gogu, P. Coiffet, and A. Barraco. *Représentation des déplacements des robots*. Hermès, 1997.
- [GdM03] J. Gangloff and M. de Mathelin. High speed visual servoing of a 6 DOF manipulator using multivariable predictive control. *Advanced Robotics*, 17(10) :993–1021, December 2003. Special issue : advanced 3D vision and its application to robotics.
- [Gog04] G. Gogu. Fully-isotropic T3R1-type parallel manipulator. In J. Lenarčič and C. Galletti, editors, *On Advances in Robot Kinematics*, pages 265–272. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [GP01a] M. Gautier and P. Poignet. Identification non linéaire continue en boucle fermée des paramètres physiques de systèmes mécatroniques par modèle inverse et moindres carrés d’erreur d’entrée. In *Proc. Of JIME01*, 2001.
- [GR03] R. S. Garcia Ramirez. *Programmation bayésienne des bras manipulateurs*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2003.
- [GW62a] V.E. Gough and S.G. Whitehall. Universal tyre test machine. In *Proc. FISITA 9th Int. Technical Congress*, pages 117–137, May 1962.
- [Hus96a] M. Husky. An algorithm for solving the direct kinematics of general Gough-Stewart platforms. *Mech. Mach. Theory*, 31(4) :365–380, 1996.
- [IIK⁺00] Y. Ihara, T. Ishida, Y. Kakino, Z. Li, T. Matsushita, and M. Nakagawa. Kinematic calibration of a hexapod machine tool by using a circular test. In *Proceedings of the 2000 Japan-USA flexible automation conference*, Ann Arbor, Michigan, juillet 2000.
- [IKG04] O. Ibrahim, W. Khalil, and S. Guégan. Dynamic modeling of some parallel robots. In *35th International Symposium on Robotics*, Villepinte, March 23-26 2004.
- [JKDW01] L. Jaulin, M. Kieffer, O. Didrit, and E. Walter. *Applied Interval Analysis, with examples in parameter and state estimation, robust control and robotics*. Springer, 2001.
- [Joh93] R. Johansson. *System Modeling and Identification*. Prentice Hall, 1993. ISBN 0-13-482308-7.
- [KB99] W. Khalil and S. Besnard. Self calibration of Stewart-Gough parallel robots without extra sensors. *Trans. on Robotics and Automation*, pages 1758–1763, 1999.
- [KCB⁺03] S. Krut, O. Company, M. Benoit, H. Ota, and F. Pierrot. I4 : A new parallel mechanism for scara motions. In *Proceedings of the 2003 International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, 2003.

- [KD99] W. Khalil and E. Dombre. *Modélisation, identification et commande des robots*. Hermès, ISBN 2-7462-0003-1, 1999.
- [KGE91] W. Khalil, M. Gautier, and C. Enguehard. Identifiable parameters and optimum configurations for robot calibration. *Robotica*, 9 :63–70, 1991.
- [KK85] P.K. Khosla and T. Kanade. Parameter identification of robot dynamics. In *Proc. Of 24th Conf. On Decision and Control*, pages 1754–1760, Ft Lauderdale, USA, 1985.
- [KK86] W. Khalil and J.F. Kleinfinger. A new geomtric notation for open and closed-loop robots. In *Proc. Of the 1986 Int. Conf. On Rob. and Autom.*, pages 1174–1179, San Francisco, USA, 1986.
- [KM97] W. Khalil and D. Murareci. Autonomous calibration of parallel robots. In *5th IFAC Symposium on Robot Control*, pages 425–428, Nantes, France, 1997.
- [KSG04] W. Khalil and S. S. Guégan. Inverse and direct dynamic modeling of gough-stewart robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(4) :754–762, August 2004.
- [LD97] A.B. Lintott and G.R. Dunlop. Parallel topology robot calibration. *Robotica*, 15 :395–398, 1997.
- [Lju99] L. Ljung. *System Identification : Theory for the User*. PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., ISBN 0-13-656695-2, 1999.
- [LVD98] JM. Lavest, M. Viala, and M. Dhome. Do we really need an accurate calibration pattern to achieve a reliable camera calibration. In *European Conf. Computer Vision (ECCV'98)*, pages 158–174, Freiburg, Germany, June 1998.
- [LWP80] J.Y.S. Luh, M.W. Walker, and R.P.C. Paul. On-line computational scheme for mechanical manipulators. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 102 :69–76, 1980.
- [Mac90] J. M. MacCarthy. *Introduction to Theoretical Kinematics*. MIT Press, 1990.
- [Mar02] F. Marquet. *Contribution à l'étude de l'apport de la redondance en robotique parallèle*. PhD thesis, LIRMM - Univ. Montpellier II, October 2002.
- [MBR02] E. Malis, J. Borrelly, and P. Rives. Intrinsic-free visual servoing with respect to straight lines. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots Systems*, pages 384–389, Lausanne, Switzerland, October 2002.
- [MCB99] E. Malis, F. Chaumette, and S. Boudet. 2 1/2 d visual servoing. *IEEE Tran. On Robotics and Automation*, 12 :238–250, April 1999.

- [MCSP02] E. Marchand, F. Chaumette, F. Spindler, and M. Perrier. Controlling an uninstrumented manipulator by visual servoing. *Int. J. of Robotics Research*, 21(7) :635–648, July 2002.
- [Mer90b] J.-P. Merlet. An algorithm for the forward kinematics of general 6 d.o.f. parallel manipulators. Technical Report 1331, INRIA, November 1990.
- [Mer93] J.-P. Merlet. Closed-form resolution of the direct kinematics of parallel manipulators using extra sensors data. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'93)*, pages 200–204, Atlanta, May 1993.
- [Mer04] J.-P. Merlet. Solving the forward kinematics of a gough-type parallel manipulator with interval analysis. *Int. J. of Robotics Research*, 23(3) :221–236, 2004.
- [MH02] F. Martin and R. Horaud. Multiple camera tracking of rigid objects. *International Journal of Robotics Research*, 21(2) :97–113, February 2002.
- [MOK84] H. Mayeda, K. Osuka, and A. Kangawa. A new identification method for serial manipulator arms. In *Proc. Of the 9th IFAC World Congress*, pages 2429–2434, Budapest, Hungary, 1984.
- [MSC05] E. Marchand, F. Spindler, and F. Chaumette. ViSP : a generic software platform for visual servoing. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 12(4), December 2005.
- [MWZ93] O. Masory, J. Wang, and H. Zhuang. On the accuracy of a Stewart platform - part II kinematic calibration and compensation. In *Int. Conf. Robotics and Automation*, pages 725–731, Atlanta, 1993.
- [NH96b] A. Nahvi and J.M. Hollerbach. The noise amplification index for optimal pose selection in robot calibration. In *Int. Conf. Robotics and Automation*, pages 647–654, Minneapolis, Minnesota, 1996.
- [OM95] M.P. Oliviers and J.R.R. Mayer. Global kinematic calibration of a Stewart platform. *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, 57(1) :129–136, 1995.
- [OSTU00] H. Ota, T. Shibukawa, T. Tooyama, and M. Uchiyama. Forward kinematic calibration method for parallel mechanism using pose data measured by a double ball bar system. In *Parallel Kinematic Machines Int. Conf.*, pages 57–62, Ann Arbor, Michigan, September 2000.
- [PE97] A.J. Patel and K.F. Ehmann. Volumetric error analysis of a stewart platform-based machine tool. *Annals of the CIRP*, 46(1) :287–290, 1997.

- [PHT95] T. Q. Phong, R. Horaud, and P. D. Tao. Object pose from 2-d to 3-d point and line correspondences. *International Journal of Computer Vision*, pages 225–243, 1995.
- [Plü65] J. Plücker. On a new geometry of space. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155 :725–791, 1865.
- [PPR98a] H. Pottmann, M. Peternell, and B. Ravani. Approximation in line space – applications in robot kinematics and surface reconstruction. In J. Lenarčič and M. L. Husty, editors, *Advances in Robot Kinematics : Analysis and Control*, pages 403–412. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [RA95] T. Ropponen and T. Arai. Accuracy analysis of a modified stewart platform manipulator. In *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 521–525, Nagoya, Japon, 1995.
- [Ren03] P. Renaud. *Apport de la vision pour l'identification géométrique de mécanismes parallèles*. PhD thesis, Université Blaise Pascal, Clermont II, September 2003.
- [RH99] Andreas Ruf and Radu Horaud. Visual servoing of robot manipulators, part "i" : Projective kinematics. *International Journal on Robotics Research*, 18(11) :1101 – 1118, November 1999.
- [RR01] A. Rauf and J. Ryu. Fully autonomous calibration of parallel manipulators by imposing position constraint. In *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2389–2394, Seoul, CorEe, 2001.
- [SA91] R. Stoughton and T. Arai. Optimal sensor placement for forward kinematics evaluation of a 6-dof parallel link manipulator. In *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'91)*, pages 785–790, Osaka, November 1991.
- [SGT⁺97] J. Swevers, C. Ganseman, B.D. Tükel, J. De Schutter, and H. Van Brussel. Optimal robot excitation and identification. *Trans. on Robotics and Automation*, 13(5) :730–740, 1997.
- [SK52] J.G. Semple and G.T. Kneebone. *Algebraic Projective Geometry*. Oxford Science Publication, 1952.
- [SK87] M. Shoham and Y. Koren. Motion control algorithms for sensor-equipped robots. *ASME Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control*, 109 :335–344, 1987.
- [SK88] M. Shoham and Y. Koren. Elimination of the joint feedback in sensor-guided robots. In *ASME Winter Annual Meeting*, volume DSC-Vol. 11, pages 409–418, Chicago, 1988.

- [SLBE91] C. Samson, M. Le Borgne, and B. Espiau. *Robot Control : the Task Function Approach*. Clarendon Press, Oxford University Press, Oxford, UK, 1991.
- [Ste65] D. Stewart. A platform with six degrees of freedom. In *Proc. IMechE (London)*, volume 180, pages 371–386, 1965.
- [TAI⁺02] W. Tanaka, T. Arai, K. Inoue, Y. Mae, and C.S. Park. Simplified kinematic calibration for a class of parallel mechanism. In *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 483–488, Washington, Washington DC, 2002.
- [TAR03] B. Telle, M.J. Aldon, and N. Ramdani. Camera calibration and 3d reconstruction using interval analysis. In *IAPR International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP 2003)*, Mantova, Italia, 2003.
- [The95] A. J. P. Theuwissen. *Solid-state imaging with charge coupled devices*. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [TK06] M. Tändl and A. Kecskeméthy. Singularity-free trajectory tracking with Frenet frames. In *1st European Conference on Mechanism Science (EuCoMeS)*, Obergurgl, Austria, February 21-26 2006.
- [TMCG02] B Thuilot, P Martinet, L Cordesses, and J Gallice. Position based visual servoing : keeping the object in the field of vision. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2002.
- [TMHF00] W. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley, and A. Fitzgibbon. *Bundle adjustment : a modern synthesis*. Lecture Notes in Computer Science, W.Triggs, A.Zisserman, R.Szeliski, Eds. Springer Verlag, 2000.
- [Vis96] P. Visher. *Improve the accuracy of parallel robot*. PhD thesis, EPFL, Lausanne, 1996.
- [Viv04] O.A. Vivas. *Contribution à l'identification et à la commande dynamique des robots parallèles*. PhD thesis, Univ. Montpellier II, 2004.
- [WHA95a] C.W. Wampler, J.M. Hollerbach, and T. Arai. An implicit loop method for kinematic calibration and its application to closed-chain mechanisms. *Trans. on Robotics and Automation*, 11(5) :710–724, 1995.
- [ZDSR96] P.B. Zobel, P. Di Stefano, and T. Raparelli. The design of a 3 dof parallel robot with pneumatic drives. In *27th ISIR*, pages 707–710, Milano, Italia, 6-8 octobre 1996.
- [ZMY95] H. Zhuang, O. Masory, and J. Yan. Kinematic calibration of a Stewart platform using pose measurements obtained by a single theodolite. In *Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pages 329–334, Pittsburgh, 1995.

- [ZWR94] H. Zhuang, K. Wang, and Z. Roth. Optimal selection of measurement configurations for robot calibration using simulated annealing. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 393–398, San Diego, Californie, 1994.
- [ZYM98b] H. Zhuang, J. Yan, and O. Masory. Calibration of Stewart platforms and other parallel manipulators by minimizing inverse kinematic residuals. *J. of Robotic Systems*, 15(7) :395–405, 1998.

Annexe A

Notice individuelle

A.1 Curriculum vitae

Marié, 34 ans, 2 enfants.

Formation

Novembre 1999 Docteur INPG, spécialité *Imagerie, Vision et Robotique*
Asservissement visuel à partir de droites et auto-étalonnage pince-caméra

Sous la direction de Bernard ESPIAU et Radu HORAUD, collaboration entre les projets BIP et MOVI de l'INRIA Rhône-Alpes et du laboratoire GRAVIR-IMAG
Président : Marie-Paule CANI

Rapporteurs : Jean GALLICE et François CHAUMETTE

Examineurs : Bernard ESPIAU, Radu HORAUD et Hans-Helmut NAGEL

Juin 1995 DEA INPG en Informatique
Asservissement visuel et calibration faible

Sous la direction de Bernard ESPIAU et Radu HORAUD

Juin 1994 Ingénieur ENSEEIHT en *Informatique et Mathématiques Appliquées*
Troisième année à Lund (Suède), dans un programme ERASMUS
Robustness to jitter in real-time systems

Sous la direction de Björn WITTENMARK

Activités d'enseignement et de recherche

Titulaire de la Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche (PEDR) depuis septembre 2004.

Enseignement

2000– . . . Maître de Conférences (CNU 61) à l'IFMA
Participation au montage de l'orientation Mécatronique
Responsable de l'U.V. Etalonnage et Identification des Systèmes
Vice-Président de la Commission de Spécialistes
Participation aux Relations Internationales

1999–2000 1/2 ATER à l'ENSIMAG

1996–1999 Moniteur de l'Enseignement Supérieur à l'ENSIMAG

Recherche

2000– . . . Membre du LaMI (EA 3867) et du LASMEA (UMR 6602 du CNRS).
Mise en place d'une activité sur la modélisation, l'identification et la commande de machines complexes, au sein de la Fédération de Recherche TIMS (CNRS 2856).

1999–2000 Membre du projet BIP de l'INRIA Rhône-Alpes
Travaux sur la commande référencée capteurs d'un robot bipède

1996–1999 Membre des projets BIP et MOVI de l'INRIA Rhône-Alpes et du laboratoire GRAVIR-IMAG
Travaux de thèse sur l'asservissement visuel

A.2 Participation aux projets scientifiques

Projet CPER Auvergne 2001–2003

Identification géométrique et dynamique de machines UGV : utilisation de la métrologie rapide par vision, LASMEA (101kEuro) / LaRAMA (17kEuro)

Responsabilités : co-responsable scientifique et financier.

Projet CNRS/ROBEA MAX 2001–2003

Machines à Architecture complexe : de la conception à la performance et à l'autonomie, LIRMM / IRCCyN / INRIA-COPRIN / LASMEA (27kEuro) / LaRAMA (11kEuro)

Responsabilités : responsable financier pour le LaRAMA, co-responsable scientifique de l'action "Identification géométrique par vision".

Projet CNRS/ROBEA MP2 2003–2005

Machines Parallèles et Précision, LIRMM / IRCCyN / INRIA-COPRIN / LASMEA (17kEuro) / LaRAMA (18kEuro)

Responsabilités : responsable scientifique de l'action "Identification géométrique par vision".

Projet régional CPER Auvergne, 2003–2005

Une machine parallèle modulaire avec un comportement réel optimisé : réalisation du démonstrateur T3R1, LaRAMA (45kEuro) / LASMEA (37kEuro)

Responsabilités : responsable scientifique de l'action "Asservissement visuel des robots parallèles".

Projet européen IP-NEXT 2005-2008

NEXT generation production systems, 25 partenaires dont LASMEA (186kEuro)

Responsabilités : responsable scientifique pour le LASMEA

Projet ANR "Jeunes chercheuses et jeunes chercheurs" VIRAGO

Nouvelles perspectives en robotique grâce à la vision rapide à exposition séquentielle

Dimensionnement : 1,28 MEuro, 36 h.m sur 4 ans – Aide demandée : 180 kEuro

Responsabilités : Porteur du projet (en cours d'évaluation)

Par ailleurs, j'ai réalisé en 2003 un **contrat industriel** (30 kEuro) avec le CEA sur l'asservissement visuel de robots non équipés de capteurs proprioceptifs. Ce contrat a permis le financement partiel de la thèse de Hicham Hadj-Abdelkader.

A.3 Animation de la communauté scientifique

Rencontres scientifiques

- Organisateur d'un séminaire scientifique sur l'identification des systèmes mécaniques, Clermont-Ferrand, Octobre 2001
- Co-organisateur du Workshop on Visual Servoing à IROS, Lausanne, Octobre 2002
- Membre du comité d'organisation des Journées Nationales de la Recherche en Robotique, Clermont-Ferrand, Octobre 2003

Présidence de sessions

- *Computer Vision : Pose Estimation and Object Recognition*, ICRA 2006, avec Sukhan Lee
- *Visual Servoing*, ICRA 2006, avec Eduardo Bayro-Corrochano

Evaluation de travaux scientifiques

Relecteur pour revues internationales (IJRR, IEEE ITRA/TRO, MMT), revue nationale (TSI) et conférences internationales (ICRA, IROS).

Présentations orales

- Séminaires GRAVIR : Juillet 2003, Février 2005, Septembre 2005
- Séminaires LaMI : Novembre 2000, Décembre 2002, Juillet 2003, Juin 2005
- Séminaire ROBEA MAX, Novembre 2002
- Département d'automatique de Lund (Suède), Janvier 2003
- Intervention à EURON Summer School on Visual Servoing, Septembre 2002
- Séminaire MOVI de l'INRIA Rhône-Alpes, Février 2002

Divers

- Membre de la Commission Scientifique et Pédagogique de l'IFMA, 2002–2004
- Vice-Président de la Commission de Spécialistes de l'IFMA depuis 2004
- Implication dans les Relations Internationales de l'IFMA
 - Membre du groupe de travail ECTS de l'IFMA depuis 2005

- Responsable d'un accord Socrates entre l'IFMA et l'université de Lund (Suède), visites en 2003 et 2004
2 étudiants envoyés, 1 étudiant accueilli
- Visite à l'université Chalmers de Göteborg (Suède) pour réactiver un accord Socrates, 2003
2 étudiants envoyés
- Visites au Danemark (Odense et Ålborg) pour ouvrir des opportunités de séjours aux étudiants de l'orientation mécatronique, 2004
2 étudiants envoyés à Odense
- Co-organisateur de "La petite vadrouille 2005", journée conviviale pour le personnel IFMA et LaMI

A.4 Activités d'encadrement et co-encadrement

Etudiant	Sujet	Date	Encadrement
Post-doc			
O. Ait-Aider 4 CI	Vision rapide pour l'identification dynamique	2004 -2006	100%
Doctorants			
F. Paccot 2 CI	Commande dynamique de robots parallèles par vision rapide	soutenance prévue en 2008	N. Andreff 70% P. Martinet 30%
T. Dallej 1 RI, 4 CI	Asservissement visuel de robots parallèles par observation des jambes	soutenance prévue en 2007	N. Andreff 70% P. Martinet 30%
H. Hadj-Abdelkader 4 CI	Commande de robots mobiles par asservissement visuel omnidirectionnel	soutenance prévue en 2006	P. Martinet 30% Y. Mezouar 40% N. Andreff 30%
P. Renaud 4 RI, 8 CI, 2 CN	Apport de la vision pour l'identification géométrique de mécanismes parallèles	2003	G. Gogu 20% P. Martinet 30% N. Andreff 50%
Master ou DEA			
F. Paccot	Commande dynamique du robot parallèle Isoglide4-T3R1	2005	100%
A. Marchadier 1 RI	Asservissement visuel de la plateforme de Gough-Stewart par observation des jambes	2004	100%
J. Yun	Identification géométrique de robots parallèles par vision	2004	100%
A. Sahli	Utilisation de la vision pour l'identification dynamique du robot H4	2003	100%
S. Ronchi	Identification des paramètres inertiels des robots manipulateurs	2002	100%
A. Abadja	Identification des paramètres inertiels	2002	100%
R. Lenain	Guidage automatique d'engins agricoles	2002	B. Thuilot 70% N. Andreff 30%

Les nombres en italiques indiquent le nombre de publications soumises.

A.5 Publications de l'auteur

Répartition des publications depuis septembre 2000

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Cumul depuis sept. 2000
Revues Internationales		(1)	(2)		1 + (1)	1	5	(4)+7
Conf. Internationales			2+(2)	3	3	5	12	(2)+25
Conf. Nationales			1		1			2
Wkshp Internationaux						2		2
Wkshp Nationaux			2			1		3

Les nombres en italiques indiquent le nombre de publications soumises.

Les nombres entre parenthèses indiquent les valorisations réalisées depuis septembre 2000 de travaux antérieurs au recrutement.

Revues internationales

- [RI1] N. Andreff, R. Horaud, and B. Espiau. Robot hand-eye calibration using structure from motion. *International Journal of Robotics Research*, 20(3) :228–248, March 2001.
- [RI2] N. Andreff, B. Espiau, and R. Horaud. Visual servoing from lines. *International Journal of Robotics Research*, 21(8) :679–700, August 2002.
- [RI3] N. Andreff and B. Espiau. Revisiting Plücker coordinates in vision-based control. In J. Lenarčič and F. Thomas, editors, *Advances in Robot Kinematics : Theory and Applications*. Kluwer Academic Publishers, ISBN 164020-0686-9, June 2002.
- [RI4] N. Andreff, P. Renaud, P. Martinet, and F. Pierrot. Vision-based kinematic calibration of an H4 parallel mechanism : practical accuracies. *Industrial Robot : An international journal*, 31(3) :273–283, May 2004.
- [RI5] C. Azevedo, N. Andreff, and S. Arias. BIPedal walking : from gait design to experimental analysis. *Mechatronics*, 14(6) :639–665, 2004.
- [RI6] P. Renaud, N. Andreff, Ph. Martinet, and G. Gogu. Kinematic calibration of parallel mechanisms : A novel approach using legs observation. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(4) :529–538, August 2005.
- [RI7] P. Renaud, N. Andreff, J.-M. Lavest, and M. Dhome. Simplifying the kinematic calibration of parallel mechanisms using vision-based metrology. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(1) :12–22, February 2006.
- [RI8] P. Renaud, A. Vivas, N. Andreff, P. Poignet, P. Martinet, F. Pierrot, and O. Company. Kinematic and dynamic identification of parallel mechanisms. *Control Engineering Practice*, 14(9) :1099–1109, 2006.

- [RI9] D. Daney, N. Andreff, G. Chabert, and Y. Papegay. Interval method for calibration of parallel robots : A vision-based experimentation. *Mechanism and Machine Theory, Special Issue on Computational Kinematics 2005*, 41(8) :929–944, 2006.
- [RI10] N. Andreff and P. Martinet. Unifying kinematic modeling, identification and control of a Gough-Stewart parallel robot into a vision-based framework. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006. **Accepté.**
- [RI11] N. Andreff, T. Dallej, and P. Martinet. Image-based visual servoing of a Gough-Stewart parallel manipulator using leg observations. *Joint Issue of International Journal on Computer Vision and International Journal of Robotics Research on Vision and Robotics*, 2006. **Accepté.**

Congrès internationaux

- [CI1] N. Andreff, R. Horaud, and B. Espiau. On-line hand-eye calibration. In *Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'99)*, pages 430–436, Ottawa, October 1999.
- [CI2] N. Andreff, B. Espiau, and R. Horaud. Visual servoing from lines. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, San Fransisco, California, USA, 2000.
- [CI3] B. Lamiroy, B. Espiau, N. Andreff, and R. Horaud. Controlling robots with two cameras : How to do it properly. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, San Fransisco, California, USA, 2000.
- [CI4] P. Renaud, N. Andreff, G. Gogu, and Ph. Martinet. Dynamic identification of mechanisms using a robust design of experiments. In *4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME'2002)*, Clermont-Ferrand, France, May 2002.
- [CI5] N. Andreff and B. Espiau. Revisiting Plücker coordinates in vision-based control. In *8th International Symposium on Advances in Robot Kinematics (ARK'2002)*, Caldes de Malavella, Spain, June 2002.
- [CI6] C. Azevedo, N. Andreff, S. Arias, and B. Espiau. Experimental BIPedal walking. In *8th International Symposium on Experimental Robotics (ISER'02)*, Sant' Angelo d'Ischia, Italy, July 2002.
- [CI7] P. Renaud, N. Andreff, M. Dhome, and Ph. Martinet. Experimental evaluation of a vision-based measuring device for parallel machine-tool calibration. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2002)*, pages 1868–1873, Lausanne, CH, october 2002.
- [CI8] P. Renaud, N. Andreff, G. Gogu, and Ph. Martinet. On vision-based kinematic calibration of n legs parallel mechanisms. In *13th IFAC Symposium on System*

- Identification (SYSID 2003)*, pages 977–982, Rotterdam, The Netherlands, 27-29 August 2003.
- [CI9] P. Renaud, N. Andreff, F. Marquet, and Ph. Martinet. Vision-based kinematic calibration of a H4 parallel mechanism. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2003)*, pages 1191–1196, Taiwan, September 2003.
- [CI10] P. Renaud, N. Andreff, G. Gogu, and M. Dhome. Optimal pose selection for vision-based kinematic calibration of parallel mechanisms. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*, volume 3, pages 2223–2228, Las Vegas, USA, October 2003.
- [CI11] P. Renaud, N. Andreff, G. Gogu, and Ph. Martinet. On vision-based kinematic calibration of a Stewart-Gough platform. In *11th World Congress in Mechanism and Machine Science (IFTOMM2003)*, pages 1906–1911, Tianjin, China, April 1-4 2004.
- [CI12] P. Renaud, N. Andreff, S. Krut, and G. Gogu. Kinematic calibration of linear-actuated parallel mechanisms from leg observation. In *35th International Symposium on Robotics*, Paris, France, April 2004.
- [CI13] P. Renaud, N. Andreff, F. Pierrot, and P. Martinet. Combining end-effector and legs observation for kinematic calibration of parallel mechanisms. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2004)*, pages 4116–4121, New Orleans, USA, April 26 - May 1st 2004.
- [CI14] N. Andreff, A. Marchadier, and P. Martinet. Vision-based control of a Gough-Stewart parallel mechanism using legs observation. In *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA '05)*, pages 2546–2551, Barcelona, Spain, April 18–22 2005.
- [CI15] H. Hadj Abdelkader, Y. Mezouar, N. Andreff, and P. Martinet. Image-based control of mobile robot with central catadioptric cameras. In *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA '05)*, pages 3533–3538, Barcelona, Spain, April 18–22 2005.
- [CI16] H. Hadj Abdelkader, Y. Mezouar, N. Andreff, and P. Martinet. 2 1/2D visual servoing with central catadioptric cameras. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005)*, pages 2342–2347, Edmonton, Canada, August 2-6 2005.
- [CI17] N. Andreff and P. Martinet. Visually servoing a Gough-Stewart parallel robot allows for reduced and linear kinematic calibration. In *Proc. Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO '05)*, volume 3, pages 119–124, Barcelona, Spain, September 14–17 2005.
- [CI18] T. Cano, N. Andreff, J.M. Lavest, and P. Ray. Identification of geometrical defects using a multiple stereovision system. In *XII Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación, (SAAEI 2005)*, 2005.

- [CI19] O. Ait-Aider, N. Andreff, J.M. Lavest, and P. Martinet. Pose and velocity computing of fast moving object using a single view from rolling shutter camera. In *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Computer Vision Systems, ICVS'06*, New-York City, USA, January 5-7th 2006.
- [CI20] N. Andreff and P. Martinet. Vision-based kinematic modelling of some parallel manipulators for control purposes. In *1st European Conference on Mechanism Science (EuCoMeS)*, Obergurgl, Austria, February 21-26 2006.
- [CI21] O. Ait-Aider, N. Andreff, P. Martinet, and J.M. Lavest. Simultaneous pose and velocity measurement for high-speed robots. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'06*, Orlando, Florida, USA, May 15-19 2006.
- [CI22] H. Hadj-Abdelkader, Y. Mezouar, N. Andreff, and P. Martinet. Omnidirectional visual servoing from polar lines. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'06*, Orlando, Florida, USA, May 15-19 2006.
- [CI23] O. Ait-Aider, N. Andreff, J.M. Lavest, and P. Martinet. Simultaneous object pose and velocity computation using a single view from a rolling shutter camera. In *Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision, ECCV'06*, volume 2, pages 56–68, Graz, Austria, May 7-13 2006. **Honorable Mention Paper Award.**
- [CI24] R. Rizk, N. Andreff, J.C. Fauroux, J.M. Lavest, and G. GOGU. Precision study of a decoupled four degrees of freedom parallel robot including manufacturing and assembling errors. In *6th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME'2006)*, Grenoble, May 2006.
- [CI25] N. Andreff, T. Dallej, and P. Martinet. Image-based visual servoing of Gough-Stewart parallel manipulators using legs observation. In *8th International IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO 2006)*, Bologna, Italy, September 2006. A paraître.
- [CI26] O. Ait-Aider, F. Paccot, N. Andreff, and P. Martinet. A novel approach to vision-based computed torque control of parallel robots. In *12th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR 2006)*, August 2006. A paraître.
- [CI27] T. Dallej, N. Andreff, and P. Martinet. 3D pose visual servoing is the canonical choice for the Cartesian control of parallel robots. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'06*, 2006. A paraître.
- [CI28] T. Dallej, H. Hadj-Abdelkader, N. Andreff, and P. Martinet. Kinematic calibration of a gough-stewart platform using an omnidirectional camera. In

Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'06, 2006. A paraître.

- [CI29] F. Paccot, N. Andreff, P. Martinet, and W. Khalil. Vision-based computed torque control of parallel robots. In *32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06)*, November 2006. A paraître.
- [CI30] T. Dallej, N. Andreff, and P. Martinet. Visual servoing of Par4 using leg observation. In *32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06)*, November 2006. A paraître.

Congrès nationaux

- [CN1] P. Renaud, N. Andreff, M. Dhome, and Ph. Martinet. Caractérisation des défauts géométriques d'un axe UTGV par vision. In *4èmes Assises Machines et usinage grande vitesse*, Lille, France, mars 2002.
- [CN2] P. Renaud, N. Andreff, P. Martinet, G. Gogu, and M. Dhome. Identification géométrique de mécanismes parallèles par vision. In *14ème Congrès Francophone AFRIF-AFIA de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, Toulouse, Janvier 2004.
- [CN3] N. Andreff and P. Pierrot. Démonstrateur I4R : architecture et identification géométrique par vision. Démonstration aux Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR'03), Octobre 2003.

Colloques internationaux

- [WI1] N. Andreff. Towards the embedding of on-line hand-eye calibration into visual servoing. In *IEEE/RSJ/INRIA Workshop On New Trends in Image-based Robot Servoing*, pages 64–70, Grenoble, September 1997.
- [WI2] D. Daney, N. Andreff, and Y. Papegay. Interval method for calibration of parallel robots : A vision-based experimentation. In *International Workshop on Computational Kinematics (CK2005)*, Cassino, Italy, May 4-6 2005.
- [WI3] N. Andreff and P. Martinet. Visual servoing of a Gough-Stewart parallel robot without proprioceptive sensors. In *Fifth International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo'05)*, Dymaczewo, Poland, June 23-25 2005.

Colloques nationaux

- [WN1] N. Andreff. Asservissement visuel d'un bras robotique en l'absence d'informations géométriques. In *5èmes Journées ORASIS*, Clermont-Ferrand, 1996.

- [WN2] N. Andreff. Une méthode itérative de calibration pince-caméra. 7èmes Journées Jeunes Chercheurs en Robotique, Toulouse, Juin 1997.
- [WN3] P. Renaud, N. Andreff, G. Gogu, P. Martinet, and F. Marquet. Etalonnage géométrique de mécanismes parallèles par vision. In *Colloque national AIP Priméca*, La Plagne, France, Mars 2002.
- [WN4] P. Renaud, N. Andreff, F. Marquet, M. Dhome, G. Gogu, P. Martinet, and F. Pierrot. Identification géométrique d'un robot parallèle H4 à l'aide d'un outil de métrologie par vision. In *Actes des 16èmes Journées Jeunes Chercheurs en Robotique*, Villeurbanne, France, Septembre 2002.
- [WN5] T. Dallej, N. Andreff, and P. Martinet. Commande référencée vision d'une plateforme de Gough-Stewart par observation des éléments cinématiques. In *Neuvièmes Journées des Jeunes Chercheurs en Vision par Ordinateur (ORASIS'05)*, Fournols, France, 24-27 mai 2005.

A.6 Liste des 5 articles les plus significatifs

1. P. Renaud, N. Andreff, Ph. Martinet, and G. Gogu. Kinematic calibration of parallel mechanisms : A novel approach using legs observation. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(4) :529–538, August 2005.
2. D. Daney, N. Andreff, G. Chabert, and Y. Papegay.
Interval method for calibration of parallel robots : A vision-based experimentation. *Mechanism and Machine Theory, Special Issue on Computational Kinematics 2005*, 41(8) :929–944, 2006.
3. N. Andreff and P. Martinet.
Unifying kinematic modeling, identification and control of a Gough-Stewart parallel robot into a vision-based framework. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006. **Accepté.**
4. N. Andreff, T. Dallej, and P. Martinet.
Image-based visual servoing of a Gough-Stewart parallel manipulator using leg observations. *Joint Issue of International Journal on Computer Vision and International Journal of Robotics Research on Vision and Robotics*, 2006. **Accepté.**
5. O. Ait-Aider, N. Andreff, J.M. Lavest, and P. Martinet.
Simultaneous object pose and velocity computation using a single view from a rolling shutter camera. In *Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision, ECCV'06*, volume 2, pages 56–68, Graz, Austria, May 7-13 2006. **Honorable Mention Paper Award.**