

Chapter 1

Introduction

Il s'agit dans ce chapitre d'introduire les problématiques et méthodologies qui nous guideront dans notre étude de l'utilisation de l'asservissement visuel pour une architecture de robot très particulière que nous allons présenter dans ce chapitre. Notre objectif est double: il s'agit dans un premier temps de perfectionner les fonctionnalités de saisie et manipulation d'objets de ces robots, et d'améliorer leurs propriétés dans un second temps.

Pour cela, nous évoquons dans une première section les avantages et inconvénients des structures parallèles comparativement aux structures en série. Les spécificités des manipulateurs à câbles sont introduites dans une deuxième section, suivie par un rappel des modèles géométriques et cinématiques des manipulateurs parallèles à câbles. Nous présentons ensuite dans une troisième section le prototype sur lequel nos expérimentations et validations ont été effectuées,

Dans une quatrième section, à la suite d'un rappel des modèles d'asservissement visuel, nous introduirons les choix de configuration que nous avons opérés, et indiquerons de quelles manières ils se démarquent des travaux existants dans ce domaine précis. En particulier, les robots à câbles peuvent fonctionner selon différents modes ; nous montrerons comment nous avons utilisé cette spécificité pour en optimiser la commande. La cinquième et dernière section présentera les problématiques de l'étude et les choix méthodologiques qui en ont permis la résolution.

1.1 Manipulateurs série et parallèles

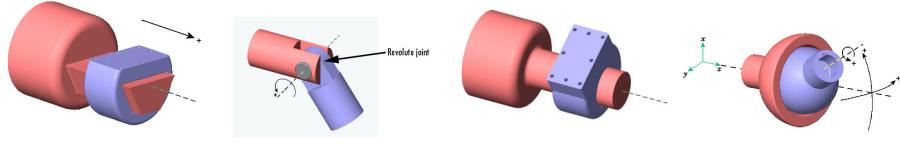
C'est incontestablement l'industrie qui aura été le principal vecteur de développement de la robotique ces deux derniers siècles. L'introduction des robots dans les usines s'inscrit dans une démarche d'augmentation de la productivité et d'amélioration des performances. Cela aura permis dès lors de soulager le travailleur humain dans des situations de travail pénible et/ou répétitif, et d'augmenter ses compétences en permettant par exemple une précision qu'il ne saurait fournir seul, ou la possibilité de déplacer des charges élevées. Si la grande diversité que recouvre aujourd'hui le terme de *robot* rend extrêmement difficile l'élaboration d'une définition générique, nous pouvons cependant en dériver des sous-catégories plus faciles à appréhender. Parmi celles-ci, nous distinguons en

particulier la classe des manipulateurs dont l'objectif sera le déplacement et positionnement d'objets dans l'espace.

1.1.1 Définitions

Un manipulateur sera constitué de manière générale d'une base et d'un organe terminal, reliés par une ou plusieurs chaînes cinématiques plus ou moins élaborées.

Une chaîne cinématique est caractérisée par une succession de solides reliés par des articulations simples ou complexes. Les articulations simples peuvent être de nature *prismatique* (Fig.1.1a) – permettant la translation d'un solide par rapport à l'autre – ou *rotoïdes* (Fig.1.1b) – effectuant un mouvement de rotation autour d'un axe donné. Des articulations complexes sont obtenues à partir de la combinaison de mouvements prismatiques et/ou rotoïdes : une articulation cylindrique (Fig.1.1c) permet par exemple la combinaison d'un mouvement de translation selon un axe donné et d'un mouvement de rotation autour de ce même axe ; autre exemple, une articulation sphérique (Fig.1.1d) combinera quant à elle trois rotations.



(a) Articulation simple de type prismatique (b) Articulation simple de type rotoïde (c) Articulation complexe combinée (d) Articulation combinée de type cylindrique posée de type sphérique

Figure 1.1: Différents exemples d'articulations.

On appelle *coordonnées articulaires* l'ensemble des valeurs prises par les paramètres permettant de décrire l'état des articulations à un instant donné. Les coordonnées articulaires sont exprimées dans un espace articulaire propre à chaque articulation. Les paramètres nécessaires à l'expression des coordonnées articulaires sont généralement au nombre de 3 pour un point (ses coordonnées dans l'espace cartésien) et de 6 pour un solide (position cartésienne complétée par trois angles de rotation). Le nombre de paramètres non fixés par la géométrie du robot et nécessaires à la description exhaustive des coordonnées d'une articulation est appelé *degré de liberté*. Lorsque les articulations ne sont pas laissées libres, leur valeur dans l'*espace articulaire* sera contrôlée par des *actionneurs* : on distinguera donc les *articulations actionnées* des *articulations passives*.

De la même manière, on parlera des *coordonnées opérationnelles* pour définir la pose de l'organe terminal, exprimées par rapport à un référentiel de référence. A nouveau, nous pouvons définir les degrés de liberté de l'organe terminal comme le nombre de paramètres contrôlés pour le déplacer dans l'espace. Cette notion est à distinguer de la mobilité de l'organe terminal, qui correspond aux possibilités de déplacement de l'organe terminal, contrôlées ou laissées libres. Si l'on décide par exemple de contrôler les mouvements en translation, de bloquer deux rotations mais d'en laisser libre une, la mobilité sera de 4, mais le nombre de degrés de libertés ne sera que de 3.

Enfin, on peut définir pour chaque segment son *degré de connexion* comme étant le nombre de solides auxquels il est relié par une articulation libre ou actionnée. Lorsque l'ensemble des segments ont un degré de connexion égal à 2 à l'exception de la base et de l'organe terminal qui ont de degré de connexion égal à 1, on parle de *chaîne cinématique ouverte* (Fig.1.2a). Lorsque l'un des segments au moins (différent de la base) possède un degré de connexion supérieur ou égal à 3, nous avons une *chaîne cinématique fermée* (Fig.1.2b) [11]. Les chaînes cinématiques complexes sont constituées de plusieurs chaînes fermées et/ou ouvertes.

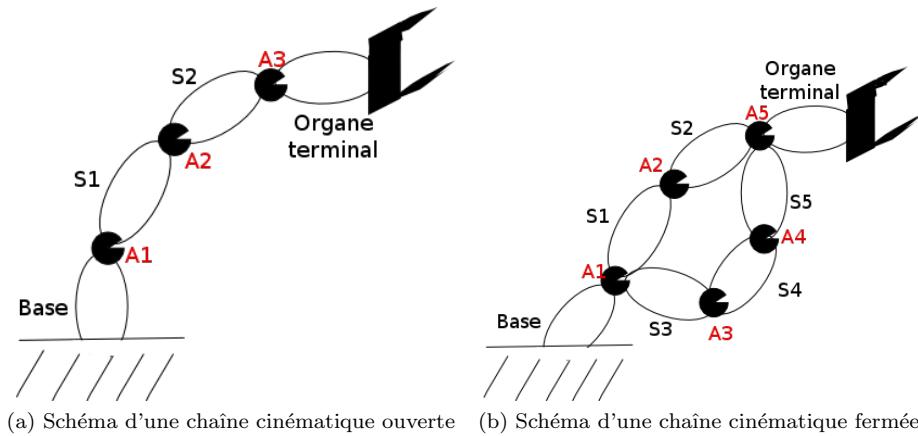


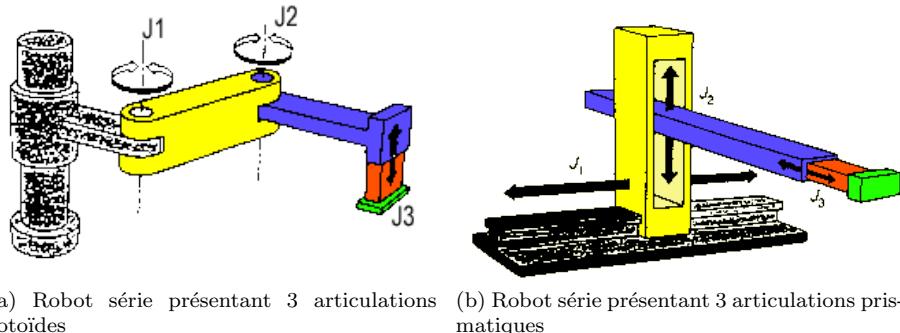
Figure 1.2: Exemples de chaînes cinématiques ouvertes et fermées : les S_i représentent les différents segments intermédiaires, tandis que les A_i correspondent aux articulations. Dans Fig.1.2a, tous les segments S_i ont un degré de connexion égal à 2 ; seuls la base et l'organe terminal ont un degré de connexion égal à 1. Il est visible dans Fig.1.2b que tous les segments à l'exception de S_4 possèdent un degré de connexion égal à 3.

1.1.2 Architectures séries

On appelle robot série un système constitué d'une chaîne cinématique ouverte dont chaque segment est relié au suivant par une articulation simple (Fig.1.3). Longtemps dominants dans l'industrie, les robots séries ont été privilégiés grâce à une relative simplicité de la commande et un espace de travail important.

Une architecture série présente toutefois plusieurs inconvénients non négligeables dans un contexte industriel tels que :

- chaque segment et articulation porte la charge de tous ceux qui leur succèdent dans la chaîne cinématique, ce qui pénalise la dynamique : segments et articulations doivent donc être rigidifiés et deviennent plus lourds,
- les erreurs de positionnement se propagent de segments en segments ; la précision tout comme la répétabilité du manipulateur en sont affectées,
- les charges manipulables ne peuvent être excessives, car elles seront supportées par chacun des segments et articulations.



(a) Robot série présentant 3 articulations rotoides (b) Robot série présentant 3 articulations prismatiques

Figure 1.3: Exemples de robots séries

Ainsi, une architecture série impose souvent un dispositif imposant, dont la précision, la dynamique et la faible capacité de charges se révèleront insuffisants pour un grand nombre de tâches requises en particulier par l'industrie moderne.

Une alternative possible consiste en l'utilisation de chaînes cinématiques fermées permettant

- une répartition des charges (segment ultérieurs et poids de l'objet manipulé),
- une compensation des erreurs entre chaque “branche” de la chaîne cinématique fermée,
- une plus grande rigidité des articulations, impliquant une dynamique plus grande.

Les architectures parallèles en particulier présentent une des déclinaisons possibles de chaînes cinématiques fermées, et leurs caractéristiques – sur lesquelles nous allons nous pencher par la suite – ont contribué à ce qu'elles s'installent progressivement dans le paysage de la robotique.

1.1.3 Architectures parallèles

Une définition des robots parallèles est donnée dans [14] :

Un manipulateur parallèle est constitué d'un organe terminal à n degrés de liberté et d'une base fixe, reliés entre eux par au moins deux chaînes cinématiques indépendantes, la motorisation s'effectuant par n actionneurs simples.

Parmi les exemples les plus cités dans la littérature, nous trouvons la plate-forme de Gough-Stewart [12], [16] et le robot Delta [7] (Fig.1.4).

Initialement développée pour des applications dans l'industrie automobile (Fig.1.4a), la plate-forme de Gough-Stewart a par la suite été utilisée dans des applications diverses parmi lesquelles les simulateurs de vols (Fig.1.4b). Sa plate-forme mobile peut être déplacée selon 6 degrés de liberté (3 translations + 3 rotations) à l'aide de six jambes indépendantes actionnées par des vérins pneumatiques. Les articulations la reliant à la base (cardan) et à la plate-forme (rotule) sont quant à elles laissées libres.

Le robot Delta (Fig.1.4c) permet un déplacement de sa plateforme selon les trois degrés de liberté de translation. Trois jambes sont utilisées pour cela, chacune étant reliée à la base par une articulation rotoïde à un levier, lui-même relié à un parallélogramme par une seconde articulation rotoïde, une troisième articulation rotoïde liant ce segment à l'organe terminal. Il peut atteindre des vitesses allant jusqu'à 10 m/s et des accélérations jusqu'à 20G, ce qui le rend particulièrement adapté pour des tâches de conditionnement.



(a) Plateforme de Gough utilisée dans une usine de pneumatiques



(b) Plateforme de Gough-Stewart utilisée pour des simulateurs de vols



(c) Robot Delta, particulièrement adapté aux tâches de conditionnement ou de "pick and place"

Figure 1.4: Exemples de robots parallèles

De manière générale, les manipulateurs parallèles présentent les caractéristiques suivantes permettant de les comparer avantageusement aux manipulateurs séries :

- une précision accrue par un mécanisme de **compensation** des erreurs

entre les différentes chaînes cinématiques (parfois appelées *jambes*),

- une capacité de charge élevée due à la **répartition** de la charge sur les différentes jambes,
- une grande rigidité qui peut être élevée car les éléments de chaînes sont sollicités en traction/compression plutôt qu'en flexion.
- une dynamique élevée conséquente de la **coopération** des différentes jambes dans le positionnement de l'organe terminal.

Toutefois, les mécanismes parallèles possèdent plusieurs inconvénients qui doivent être pris en compte lors du choix d'une architecture :

- des relations complexes entre entrées et sorties,
- des positions dites *singulières* pouvant conduire à une perte de contrôle du manipulateur, et qui limite l'espace de travail.
- un espace de travail restreint aux limites de variation des variables articulaires. A titre d'exemple, la variation d'altitude d'une plateforme de Gough-Stewart ne peut excéder la course des actionneurs linéaires des jambes.

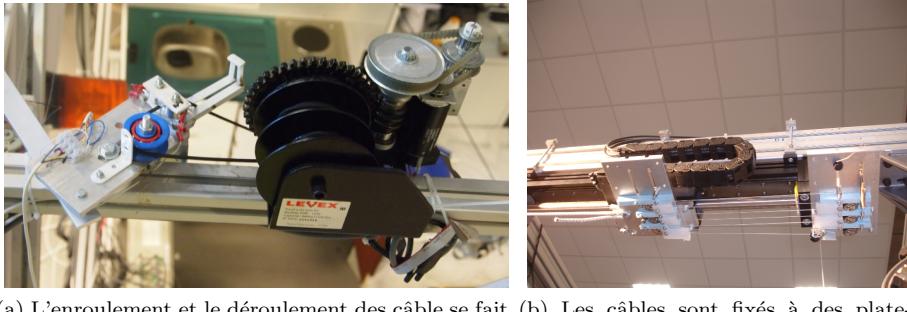
L'architecture des robots parallèles à câbles que nous allons présenter dans la section suivante a été proposée dans le but de s'affranchir de cette dernière contrainte de limitation de l'espace de travail, qui est une contrainte forte des mécanismes parallèles. L'intégralité des travaux présentés dans ce manuscrit étant consacré à l'étude et au développement de cette catégorie particulière de manipulateurs, nous utiliserons dorénavant pour les désigner les noms de robots, manipulateurs, robots parallèles à câbles ou CDPR (pour *cable-driven parallel robot*).

1.2 Les manipulateurs parallèles à câbles

Les manipulateurs parallèles à câbles présentent une structure en chaînes cinématiques fermées, la base et la plateforme étant reliées au moyen de câbles. Les actionneurs sont en général positionnés sur la base et leur fonction consiste à contrôler la longueur des câbles.

Afin de contrôler la longueur des câbles, plusieurs types de systèmes peuvent être utilisés, parmi lesquels :

- un tambour actionné par un moteur rotatif sur lequel s'enroule ou se déroule le câble (Fig.1.5a). La mesure de la longueur du câble déroulé est obtenue en mesurant la rotation du tambour ; cette mesure est relativement imprécise si l'enroulement n'est pas guidé.
- le câble est attaché au chariot d'un actionneur linéaire, un système de démultiplication à poulies permettant d'amplifier le déplacement du câble (Fig.1.5b). La mesure du déplacement du chariot permet une estimation précise de la longueur du câble [13].



(a) L'enroulement et le déroulement des câbles se fait ici par un système de poulie actionnée par un moteur
(b) Les câbles sont fixés à des plateformes pouvant se déplacer linéairement sur des rails, permettant un contrôle de la longueur

Figure 1.5: Deux types d'articulations et d'actionnement pour un robot à câble

Dans tous les cas, ces systèmes permettent d'obtenir une très large variation sur les longueurs des câbles, solutionnant ainsi le problème de l'espace de travail. On a pu ainsi construire des robots travaillant sur des volumes de $100m \times 35m \times 35m$ (Marionet-Crane, Fig.1.8a).

Toutefois, quelque-soit le type d'articulation et d'actionnement choisis, la force que peut exercer un seul câble sur l'organe terminal est nécessairement unilatérale : *un câble seul peut tirer, mais ne peut pas pousser la plateforme*. Il faut donc, pour pouvoir contrôler le mouvement dans son intégralité, que les câbles subissent une opposition. Il a ainsi été montré que $n + 1$ câbles au minimum sont requis pour assurer le contrôle de n degrés de liberté [15]. On peut cependant considérer la gravité comme une force unilatérale et la représenter comme un câble virtuel jouant le rôle d'opposition : il est ainsi possible de n'utiliser que n câbles pour n degrés de liberté.

On distingue donc deux types de configurations pour un robot parallèle à câbles :

- en *configuration pleinement contrainte* (Fig.1.6a), les câbles travaillent en opposition et $n + 1$ sont nécessaires pour assurer des déplacements et l'application de forces correspondant à n degrés de liberté.
- en *configuration suspendue* (Fig.1.6b), la gravité agit comme un câble virtuel : les câbles sont fixés généralement au point le plus haut du dispositif, et n suffisent pour déplacer et orienter l'organe terminal selon n degrés de liberté. On retrouve parfois ce type de configuration dans la littérature sous le nom de *grue/crane*. Pour exemple, le manipulateur *Nist Spider* [1] mentionné précédemment présente une configuration suspendue.

Une caractéristique particulière des manipulateurs parallèles à câbles qui les différencie des manipulateurs parallèles classiques est la **non-rigidité des jambes**. Sous certaines conditions, un ou plusieurs câbles peuvent être détendus, ce qui a pour effet qu'ils n'exercent plus de force sur la plateforme. Nous reviendrons plus loin sur ce point essentiel.

Comparativement donc aux robots parallèles classiques, les robots parallèles à câbles présentent les caractéristiques suivantes :

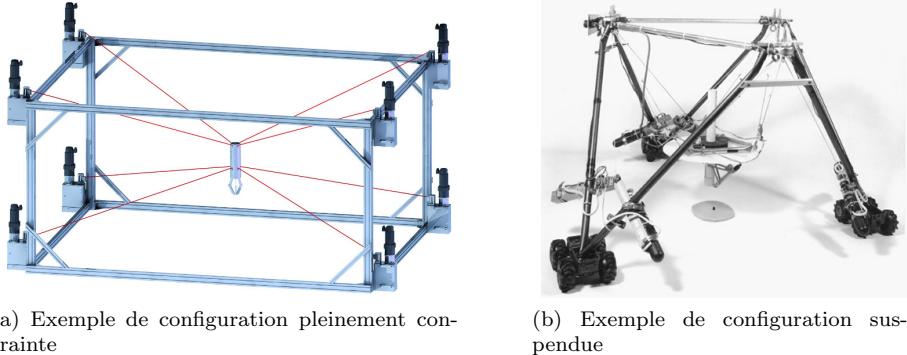


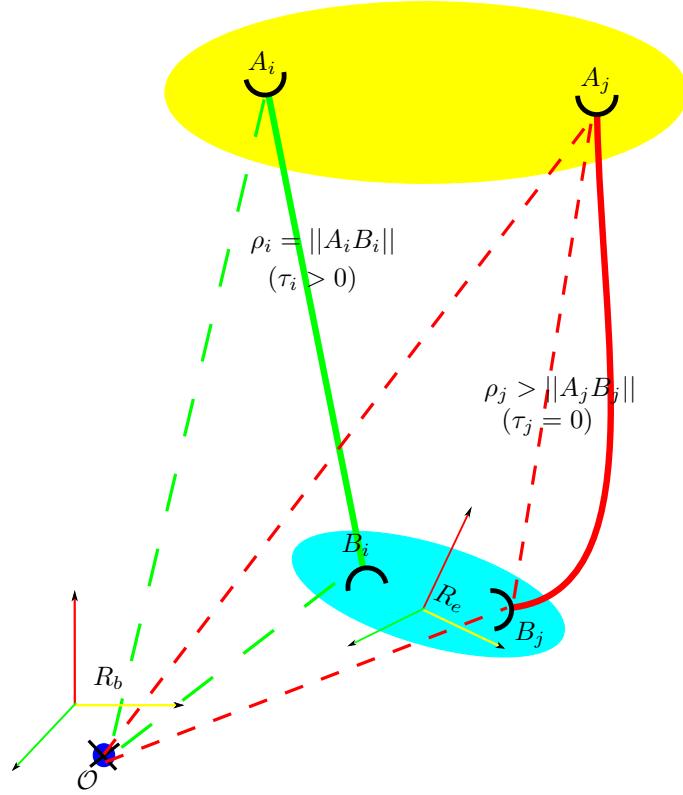
Figure 1.6: Deux configurations possibles pour un robot parallèle à câble

- la structure parallèle permet de conserver les propriétés de compensation des erreurs, de répartition des charges et des efforts, de coopération des chaînes cinématique pour l'exécution d'un mouvement
- l'espace de travail est considérablement agrandipar rapport aux robots parallèles à jambes rigides
- l'équipage mobile est très léger, ce qui peut favoriser la dynamique
- le comportement des câbles (non-déformables, élastiques, pesants, ...) peut complexifier le modèle du robot sérieusement
- l'unilatéralité des forces implique que nous puissions nous retrouver dans une situation avec un ou plusieurs câbles détendus, ce qui doit être pris en compte dans le contrôle.

Après avoir introduit quelques notations, nous allons à présent décrire les modèles géométriques direct et inverse, cinématiques ainsi que l'équilibre statique pour les robots parallèles à câble. Ceci nous permettra de lister tant que faire se peut l'ensemble des difficultés posées par ce type de manipulateur et auxquelles nous avons été confrontées dans le cadre de nos recherches.

1.2.1 Notations

- R_b : référentiel de la base
- R_e : référentiel de l'organe terminal
- A_i : point d'attache du $i^{\text{ème}}$ câble à la base ; le terme de *point de sortie* sera également utilisé.
- B_i : point d'attache du $i^{\text{ème}}$ câble à l'organe terminal
- C : un point arbitraire de l'organe terminal utilisé comme référence pour sa position
- ρ_i : longueur réelle du câble i



- l_i : longueur déroulée du câble i
- \mathcal{F} : vecteur des forces exercées sur l'organe terminal
- \mathbf{J} : jacobienne du robot

Enfin, on utilisera la notation J^{-1} pour exprimer la jacobienne inverse, et J^{-T} sera utilisé comme raccourci de notation pour sa transposée.

Sauf mention du contraire, **nous supposerons dans la suite que les câbles sont non-pesants et non-élastiques**, ce qui est une hypothèse adéquate pour le robot que nous avons utilisé.

1.2.2 Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse consiste à déterminer les coordonnées articulaires à partir des coordonnées opérationnelles. Dans le cas des robots parallèles à câbles, les coordonnées articulaires correspondent aux longueurs ρ des câbles. Lorsque ceux-ci sont tendus, cette longueur doit être égale à la distance entre les points de sortie \mathbf{A}_i et le point d'attache à la plateforme \mathbf{B}_i . Dans le cas où le câble est détendu, la longueur sera supérieure à cette distance (Fig.1.7a).

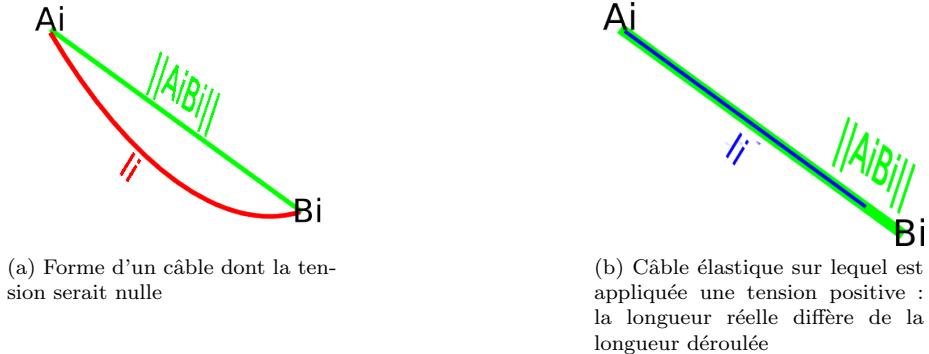


Figure 1.7: Dans le cas d'un câble détendu (tension nulle), la longueur déroulée sera supérieure à la distance entre les deux points d'attache ; de plus, la forme du câble sera telle qu'il y a risque d'intersection avec d'autres câbles, l'environnement, Dans le cas d'un câble élastique tendu (tension strictement positive), la longueur déroulée sera inférieure à la distance entre les points d'attache correspondant à la longueur réelle du câble

Nous partons donc des relations suivantes :

$$\rho_i = \|\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i\|, \text{ if } \tau_i > 0 \quad (1.1)$$

$$\rho_i \geq \|\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i\|, \text{ if } \tau_i = 0 \quad (1.2)$$

Comme on le voit, il n'est pas possible d'obtenir les longueurs ρ_i sont prendre en compte les tensions τ_i . Dès lors, tout comme dans l'approche développée par [3], nous parlerons donc de modèle géométrico-statique inverse, requérant l'étude de l'équilibre statique.

1.2.3 Equilibre statique

On dit d'un solide au repos qu'il est en équilibre statique lorsque l'ensemble des forces extérieures $\mathbf{F}_{\text{ext}_i}$ qui s'exercent sur lui s'annulent, ce qui se traduit par la relation suivante :

$$\sum_i \mathbf{F}_{\text{ext}_i} = \vec{\mathbf{0}} \quad (1.3)$$

Sous l'hypothèse que les forces mécaniques de frottement et de résistance peuvent être ici négligées, nous considérons uniquement la force de gravité exercée sur la plateforme ainsi que les efforts exercés par chacun des câbles.

La direction dans laquelle un câble de longueur ρ_i relié à la base au point \mathbf{A}_i et à la plateforme au point \mathbf{B}_i exerce une force sur la plateforme est donnée par le vecteur $\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i}{\rho_i}$. On peut dès lors définir pour ce câble un torseur \mathbf{W}_i correspondant aux efforts et couples exercés par celui-ci sur la plateforme :

$$\mathbf{W}_i = (\mathbf{u}_i^T, p_i \times \mathbf{u}_i)^T \quad (1.4)$$

où p_i est un vecteur allant d'un premier point de référence arbitraire localisé sur la plateforme à un second point placé sur le segment $[A_i B_i]$. La force exercée par le câble sur la plateforme est alors $\mathbf{W}_i \tau_i$, où τ_i est un scalaire positif représentant l'intensité de la tension. De la même manière, en posant

Soit \mathbf{W}_g le torseur indiquant la direction dans laquelle la gravité est exercée dans le référentiel choisi, pour n câbles, (Equ.1.3) s'écrit pour nous :

$$[\mathbf{W}_1 \quad \mathbf{W}_2 \quad \dots \quad \mathbf{W}_n \quad \mathbf{W}_g] \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \dots \\ \tau_n \\ mg \end{bmatrix} = \vec{0} \quad (1.5)$$

En posant $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^T$, \mathbf{W} la matrice $6 \times n$ dont les colonnes sont les n torseurs \mathbf{W}_i , et en isolant $\mathbf{F} = \mathbf{W}_g mg$ modélisant la force de gravité, la relation (Equ.1.5) s'écrit également :

$$\mathbf{F} + \mathbf{W}\boldsymbol{\tau} = \vec{0} \quad (1.6)$$

soit

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^{-T} \boldsymbol{\tau} \quad (1.7)$$

où $\mathbf{J}^{-1} = -\mathbf{W}^T$ est une matrice que l'on appelle *jacobienne inverse*.

1.2.4 Modèle géométrico-statique inverse (ou *MGSI*)

Connaissant les paramètres de pose de la plateforme, on peut en déduire les longueurs supposées ρ_i des câbles à partir des données du modèle géométrique inverse. Dans le cas où nous avons $m \geq 6$ câbles, l'équilibre statique possède en théorie une infinité de solutions. Nous ne considérons alors que les ensembles de solutions pour lesquelles les ρ_i sont tous strictement positifs. Si $m = 6$, la solution de l'équilibre statique est unique.

Il nous faut cependant étudier les situations pour lesquelles l'équilibre statique est vérifié pour $m < 6$ câbles. Dans ce cas, si les τ_i correspondants sont strictement positifs, cela signifie qu'une solution existe avec seulement $m < 6$ câbles, et nous ne contrôlons plus que m degrés de libertés.

Nous nous retrouvons dans une même situation lorsque nous étudions un CDPR sous-constraint, c'est-à-dire possédant moins de câbles que de degrés de libertés. Pour un robot à $m < 6$ câbles, l'équilibre statique est vérifié uniquement si l'ensemble des déterminants $m+1 \times m+1$ de la matrice \mathbf{W} sont nuls [4]. Si tous les τ_i sont strictement positifs, le modèle géométrico-statique possède alors une solution, mais correspondant à un mode dégradé du système.

1.2.5 Modèle géométrico-statique direct

Résoudre le modèle géométrique direct consiste à calculer les coordonnées opérationnelles à partir de la donnée des coordonnées articulaires. Il s'agit donc dans le contexte d'un robot parallèles à câbles de déduire la pose de la plateforme (position et orientation) à partir des longueurs des câbles. C'est un problème qui a posé de nombreux défis mathématiques et algorithmiques dans le cas des robots parallèles rigides [14].

Supposons que nous cherchions à déterminer l'ensemble des paramètres de pose (translations et rotations) pour un robot à 6 câbles. Le *MGD* est alors un problème à 6 variables. Si nous avons 6 (ou plus) câbles tendus, nous avons 6 (ou plus) équations. La statique possède également 6 variables (les tensions) et 6

équations (les forces et couples dans chaque direction). On vérifie l'existence de l'équilibre avec la statique, puis nous pouvons déterminer l'ensemble des poses possibles pour les longueurs de câbles données.

Considérons maintenant que l'un des câbles est mou. Le *MGD* nous donne 5 équations pour 6 variables. La statique par contre nous donne 6 équations (toujours les forces et couples exercés sur la plateforme) mais pour désormais 5 variables (les 6 – 1 câbles tendus). Nous nous retrouvons donc avec un système à 11 équations contenant 11 inconnues.

De manière générale, pour $p < 6$ câbles, nous aurons p équations à 6 inconnues fournies par le *MGD* et 6 équations à p inconnues grâce à l'équilibre statique. Soit $p + 6$ équations à $6 + p$ inconnues.

Supposons maintenant que notre manipulateur est en configuration suspendue avec 6 câbles de longueurs connues. La résolution du système peut amener à une ou plusieurs solutions telle(s) que la tension dans les 6 câbles est strictement positive. Si toutefois nous lançons la plateforme, avec des longueurs déroulées de câbles correspondant aux données du problème, il est possible qu'elle arrive à une des positions calculées, mais il est aussi possible qu'elle se retrouve dans une position complètement différente. En effet, la pose peut être telle qu'un ou plusieurs câbles ne seront pas tendus.

Si l'on veut résoudre le *MGD* pour un robot à câbles, l'ensemble suivant des situations doit donc être considéré, à savoir :

- tous les câbles sont en tension, et il existe éventuellement plusieurs solutions
- un câble n'est pas en tension, le *MGD* doit être résolu pour $m - 1$ câbles
- 2, 3, ... câbles ne sont pas en tension, le *MGD* doit être résolu pour $m - 2$, $m - 3$, ... câbles

Ce qu'il faut retenir ici, c'est qu'il est difficile lors d'un déplacement de prévoir à l'avance quels câbles seront en tension en chaque point de la trajectoire ainsi que la valeur des tensions.

Ce point, très peu mentionné dans la littérature, est un des inconvénients majeurs de l'utilisation des robots parallèles à câbles. Le premier chapitre de ce travail montrera qu'il est toutefois possible d'élaborer une stratégie prenant ce problème en compte pour améliorer le contrôle et la stabilité du système pour la grande majorité des situations.

1.2.6 Modèle cinématique

Le modèle cinématique consiste à établir une relation entre les vitesses des coordonnées articulaires Θ et celles des coordonnées opérationnelles \mathbf{X} .

Nous avons vu que le vecteur $\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i$ peut être calculé de deux manières différentes :

- connaissant la pose de la plateforme et sa géométrie, les coordonnées de \mathbf{B}_i sont données ; \mathbf{A}_i étant connu par la géométrie du robot, on peut définir une fonction H_1 dépendante uniquement de la pose telle que :

$$\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i = H_{1|i}(\mathbf{X}) \quad (1.8)$$

- à partir des coordonnées articulaires (et éventuellement de la pose si l'intervention de l'équilibre statique est requise), le *MGSD* permet de définir la relation suivante :

$$\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i = H_{2|i}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\Theta}) \quad (1.9)$$

Si \mathbf{AB} est le vecteur composé des différents $\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i$, alors on obtient en combinant (Equ.1.8) et (Equ.1.9) :

$$\begin{aligned} \mathbf{AB} &= H_1(\mathbf{X}) \\ \mathbf{AB} &= H_2(\mathbf{X}, \boldsymbol{\Theta}) \\ \implies H_1(\mathbf{X}) &= H_2(\mathbf{X}, \boldsymbol{\Theta}) \end{aligned} \quad (1.10)$$

En différentiant (Equ.1.10), on obtient :

$$\frac{\partial H_1}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{T}} = \frac{\partial H_2}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{T}} + \frac{\partial H_2}{\partial \boldsymbol{\Theta}} \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}}{\partial \mathbf{T}} \quad (1.11)$$

soit :

$$\dot{\boldsymbol{\Theta}} = \left(\frac{\partial H_2}{\partial \boldsymbol{\Theta}} \right)^{-1} \left(\frac{\partial H_1}{\partial \mathbf{X}} - \frac{\partial H_2}{\partial \mathbf{X}} \right) \dot{\mathbf{X}} \quad (1.12)$$

Si $\left(\frac{\partial H_2}{\partial \boldsymbol{\Theta}} \right)$ est bien inversible, nous pouvons définir une matrice J^{-1} de manière à obtenir la relation suivante :

$$\dot{\boldsymbol{\Theta}} = J^{-1} \dot{\mathbf{X}} \quad (1.13)$$

Le vecteur $\dot{\mathbf{X}}$ est alors appelé le torseur cinématique et correspond à la variation instantanée des paramètres de pose par rapport au temps. La matrice J^{-1} est également appelée *Jacobienne inverse* du robot, et dépend à la fois des paramètres de pose et des coordonnées articulaires.

1.3 Présentation du Marionet-Assist

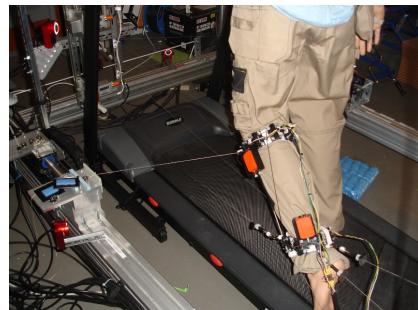
Les **Marionet** sont une classe de robots à câbles développés par l'EPI Hephaistos pour des applications diverses :

- **Marionet-Crane** (Fig.1.8a) : intervention à grande échelle pour des opérations de sauvetage dans des situations de catastrophe naturelle
- **Marionet-Rehab** (Fig.1.8b) : rééducation et assistance à la personne ; pouvant atteindre des vitesses allant jusqu'à 100m/s, il est également possible de l'utiliser pour des opérations de transfert ultra-rapides
- **Marionet-School** (Fig.1.8c) : pédagogie et diffusion ; ces robots sont utilisés entre autres pour illustrer de manière ludique des propriétés géométriques et mathématiques auprès des publics jeunes

Le robot **Marionet-Assist** a été développé dans un objectif d'assistance aux personnes à mobilités réduites, et plus spécifiquement dans une démarche d'amélioration de l'autonomie des publics concernés. Il doit pouvoir répondre à des situations tout aussi diverses que :



(a) Marionet-Crane description



(b) Marionet-Rehab description



(c) Marionet-School description

Figure 1.8: Exemples d'utilisation des robots Marionet

- soutien ponctuelle au déplacement pour une personne âgée expérimentant une fatigue articulaire (par exemple pour la passage de la baignoire) (Fig.1.9a)
- aide au transfert d'une position à une autre pour une personne atteinte de paraplégie (des toilettes au fauteuil par exemple) (Fig.1.9b)
- soutien des aidants lors du transfert de personnes atteintes de tétraplégie (déplacement du lit vers un fauteuil par exemple) (Fig.1.9c)

Un dispositif répondant à ces impératifs doit présenter les caractéristiques suivantes :

- pouvoir supporter des charges correspondant au poids d'une personne
- avoir un espace de travail équivalent à la taille d'une pièce de vie

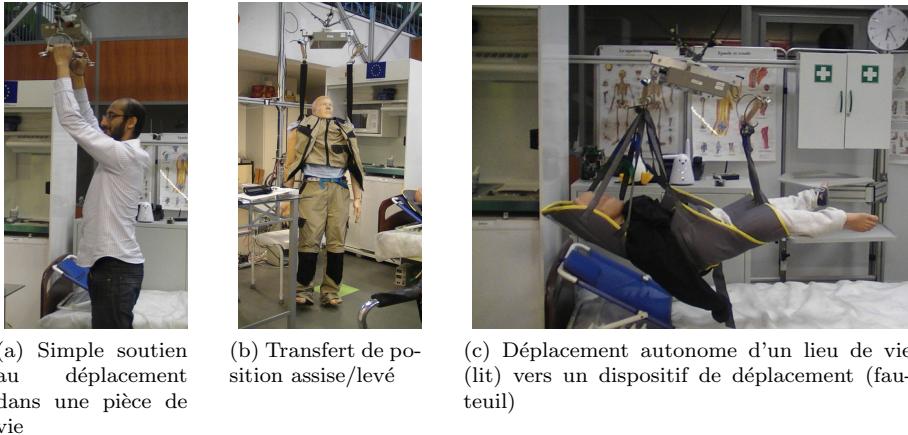


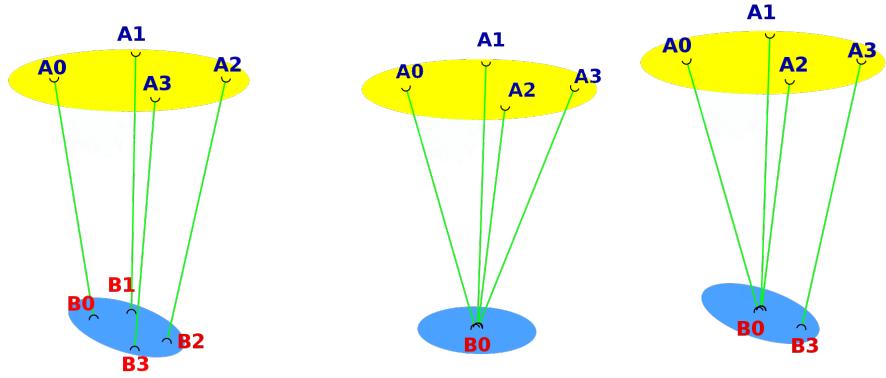
Figure 1.9: Différents types de fragilités motrices dans des situations de la vie quotidienne

- être léger et suffisamment discret et modulaire pour ne pas bouleverser l'environnement de l'utilisateur
- avoir une précision suffisante pour permettre un positionnement garantissant la sécurité, l'efficacité et le confort des opérations de transfert et d'attachement/détachement de l'utilisateur à la plateforme.

Le choix d'utilisation d'un robot parallèle à câbles semble donc le plus compatible avec l'ensemble de ces exigences. Marionet-Assist a ainsi été conçu et déployé dans un appartement-témoin (Fig.1.12a,1.12b) situé dans les locaux d'INRIA. Les câbles permettant le contrôle de la plateforme sont fixés sur le plafond de l'appartement. Dans sa configuration actuelle, Marionet-Assist est équipé de 4 câbles, mais peut en contrôler jusqu'à 6. Plusieurs stratégies sont envisageables au niveau des points de fixation sur la plateforme :

- les points d'attaches des câbles sont tous différents, il est alors possible avec n câbles de contrôler n degrés de liberté. Cette configuration sera notée $N - N$ (Fig.1.10a).
- les câbles sont attachés en un même point à la plateforme : il est possible à partir de 3 câbles de contrôler les déplacements en translation de la plateforme ; l'utilisation de plus de 3 câbles permet alors d'augmenter la taille de l'espace de travail. On parle dans ce cas de configuration $N - 1$ (Fig.1.10b).
- certains câbles seulement sont attachés en un même point sur la plateforme. Dans le cas par exemple d'une disposition pour laquelle 3 câbles sont attachés en un même point B_0 et un quatrième câble relié à la plateforme en un point B_1 , cette configuration sera notée $4 - 3 - 1$ (Fig.1.10c).

Pour l'ensemble des expériences menées dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé la configuration $4 - 1$ (Fig.1.12c) qui nous permet de contrôler les déplacements en translation, le quatrième ayant été ajouté pour augmenter l'espace de travail de manière à pouvoir se déplacer dans la quasi-totalité de



(a) Configuration 4 - 4 : chaque câble est relié à la plateforme en un point distinct

(b) Configuration 4-1 : Les 4(c) Configuration 4-3-1 : 3 câbles sont reliés à la plate-câbles sont reliés à la plate-forme en un seul point forme en un même point, le quatrième est relié en un point distinct

Figure 1.10: Exemples de configurations avec 4 câbles

l'appartement-témoin. La figure (Fig.1.13) montre l'espace de travail atteignable pour chaque triplet de câbles en tension : on note qu'en tout point qui ne se trouve pas sur l'une des deux diagonales définies par les points ($A_0 - A_2$) et ($A_1 - A_3$), il existe pour chaque pose deux configurations possibles avec trois câbles en tension, et qu'à l'exception du point d'intersection de ces diagonales, au moins une configuration avec trois câbles tendus existe.

Les câbles sont en Kevlar, ce qui nous permet de négliger leur élasticité et de pouvoir les modéliser comme des jambes rigides lorsque leur tension est strictement positive. Le contrôle des longueurs se fait à l'aide de poulies actionnées par des moteurs rotatifs (Fig.1.12d). Toutefois, en l'absence de guide pour l'enroulement, il existe des incertitudes sur la longueur déroulée ; afin de pallier à cet inconvénient, des référentiels ont été disposés sur les câbles à intervalles connus, ce qui permet lors de leur détection de réactualiser la valeur estimée de la longueur déroulée.

Dans cette configuration, nous ne contrôlons que les trois degrés de liberté correspondant aux translations le long des axes du référentiel global. Pour un triplet de trois câbles en tension strictement positive, la solution au *MGD* est unique et peut être calculée analytiquement. La *Jacobienne inverse* possède en outre une forme relativement simple : ses lignes correspondent aux vecteurs $s = A_i B_i$ normalisés par la longueur ρ_i

$$\mathbf{J}_i^{-1} = \begin{bmatrix} s_x & s_y & s_z \\ \rho_i & \rho_i & \rho_i \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Ces propriétés font de **Marionet-Assist** un robot adapté au contexte pour lequel il a été conçu. Nous avons cependant souhaité améliorer ses fonctionnalités de manipulation en lui permettant de ne pas seulement déplacer une personne, mais également des objets de la vie quotidienne. Il peut s'agir par exemple de ramasser un objet tombé au sol, ou d'amener à l'utilisateur un objet (des lunettes par exemple) localisé à un endroit de la pièce éloigné de celui auquel il se trouve. Afin de localiser l'objet, puis de guider le robot dans son

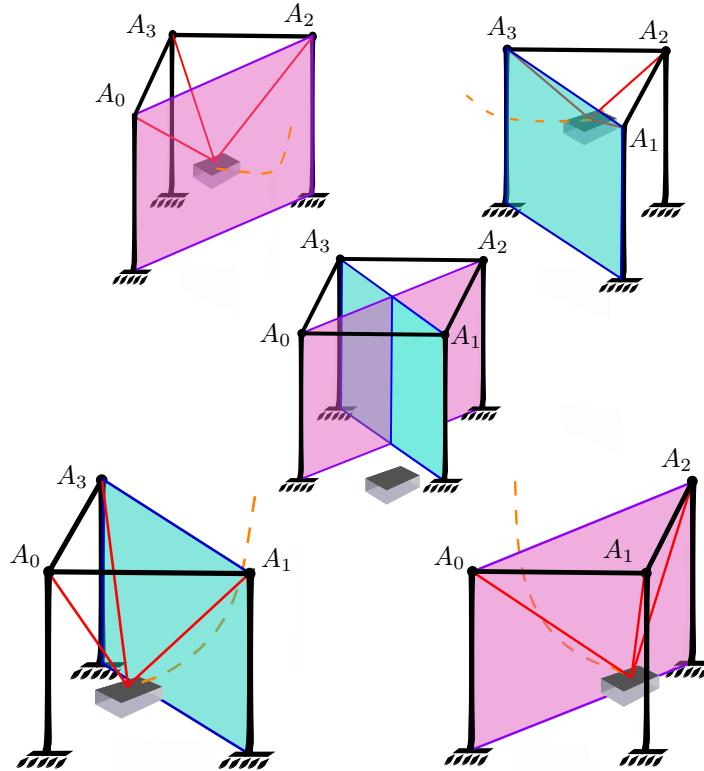


Figure 1.11: La figure au centre représente le robot Marionet-Assist ; en bas à gauche est représenté l'espace de travail atteignable lorsque les câbles attachés aux points A_0 , A_1 , A_3 sont en tension, en bas à droite l'espace de travail atteignable pour les câbles reliés aux points A_0 , A_1 , A_2 . En haut à gauche, nous avons l'espace de travail correspondant aux câbles A_0 , A_2 , A_3 en tension, et en haut à droite l'espace de travail atteignable pour les câbles attachés aux points A_1 , A_2 , A_3 .

déplacement et dans la manipulation de l'objet cible, une caméra a été ajoutée sur la plateforme, de manière à utiliser des techniques d'asservissement visuel. Ce sont ces dernières que nous allons à présent introduire, avant d'indiquer d'une part les problématiques posées par leur utilisation dans ce contexte particulier, et d'autre part les différentes possibilités d'améliorations que cela autorise concernant le contrôle des robots parallèles à câbles.

1.4 Asservissement visuel

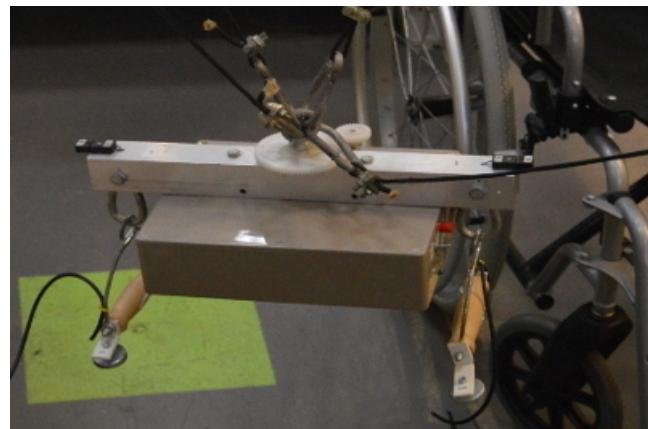
La vision représente pour les humains environ 70% des données issues des perceptions sensorielles externes [?] : d'une richesse incroyable, c'est aussi, par conséquent, une source d'erreurs inépuisable. La vision artificielle ne déroge pas à ses deux principes, d'où l'importance du traitement du signal d'une part (dans le but de recueillir et interpréter dans cette immensité d'informations ce qui est pertinent pour une tâche prescrite) et d'une stratégie d'asservissement d'autre part (afin de stabiliser une commande de tâche malgré les erreurs et incertitudes sur les données). Nous allons donc dans un premier temps présenter



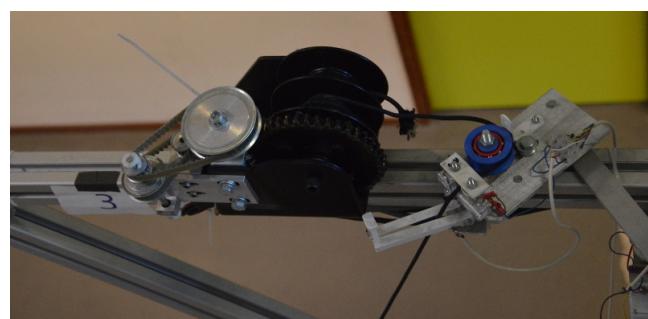
(a) Vue globale de l'appartement-témoin



(b) Vue aérienne de l'appartement-témoin



(c) Plateforme de Marionet-Assist



(d) Système d'enroulement et actionneurs pour un câble

Figure 1.12: Marionet-Assist

le mode d'acquisition des images, puis nous continuerons sur les modèles de perception utilisés. Une fois que nous aurons détaillé la manière dont une scène est projetée sur une image, nous pourrons distinguer plusieurs configurations et exposer différentes stratégies d'asservissement pouvant être utilisées. Nous développerons enfin les caractéristiques spécifiques à celle que nous avons sélectionnée dans le contexte de ces travaux.

1.4.1 Modèles de capteurs et projections

De l'oeil à la caméra

Sans pour autant chercher à imiter la vision humaine, la vision artificielle s'en inspire néanmoins fortement pour ce qui concerne l'acquisition d'une scène. Ainsi, pour une caméra, le diaphragme joue le rôle de l'iris et de la pupille et détermine la quantité de lumière qui pourra être enregistrée sur un intervalle de temps donné. Par la suite, la lentille joue un rôle équivalent à la cornée et au cristallin, en faisant converger les rayons lumineux vers la rétine sur laquelle sont disséminés environ 125 millions de photorécepteurs : c'est au niveau de ces derniers que l'acquisition est véritablement effectuée. On distingue parmi les photorécepteurs :

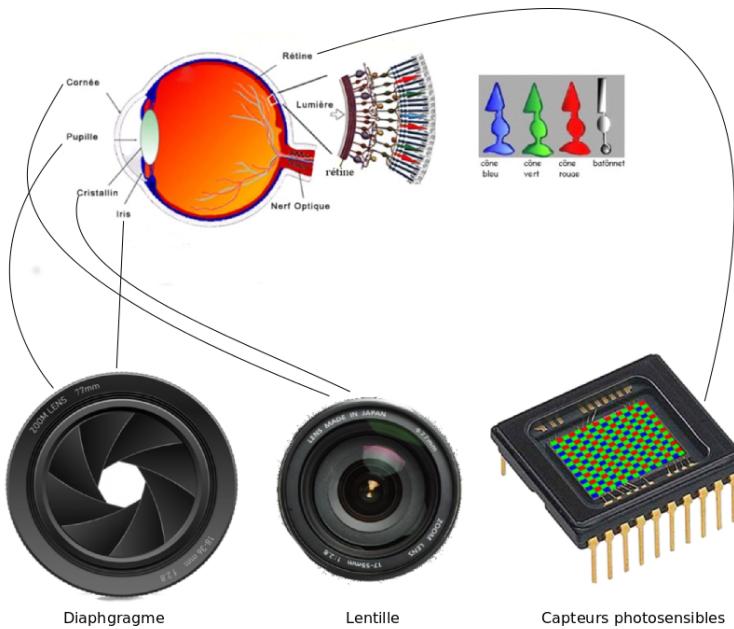


Figure 1.13: Oeil humain vs vision artificielle

- les cônes, généralement impliqués dans la vision diurne. Les cônes présentent 3 types de pigments leur permettant de réagir à des longueurs d'ondes spécifiques (qui ne recouvrent pas exactement le triplet RGB traditionnellement utilisé pour le traitement d'image)
- les bâtonnets, impliqués dans la vision nocturne. Ne possédant d'un seul type de pigments, ils ne peuvent pas discriminer les longueurs d'ondes.

En revanche, ils sont en moyenne 1000 fois plus sensibles à la lumière que les cônes, et leur population correspond à 20 fois celle des cônes.

Afin de simuler l'activité des photorécepteurs de l'oeil humain, les dispositifs technologiques les plus récents adoptent des stratégies basées sur l'utilisation de filtres placés en amont des capteurs photosensibles, permettant ainsi une acquisition en séquence (un même récepteur recevra successivement les réponses des filtres correspondants aux longueurs d'ondes distinguées) ou simultanée (les réponses sont envoyées sur des capteurs photosensibles dédiés).

L'information contenue dans les données ainsi recueillies est riche et multiple : elle peut-être de nature colorimétrique, géométrique, elle permet de caractériser des déplacements, des déformations. Toutefois, ce qui est vu n'est jamais qu'une représentation de ce qui est observé : il est donc nécessaire de reconstruire le plus fidèlement possible la scène initiale projetée sur les capteurs.

De la scène à l'image

Nous avons privilégié le modèle *pinhole* qui offre une approximation fiable des caméras perspectives (telles que celles que nous avons utilisées) tout en restant formellement simple [10], sous les hypothèses du respect des conditions de Gauss (angles de faibles incidences), et – c'est notre cas – d'une absence de distorsion de la caméra.

Soient $\mathbf{P} = (X, Y, Z)$ les coordonnées 3-D d'un point dans l'espace et $\mathbf{p} = (x, y)$ ses coordonnées dans l'image. Le modèle de projection perspective consiste en une projection centrale de centre \mathcal{C} , portée par l'axe \mathbf{z}_c représentant l'axe optique de la caméra. On appelle *plan image* le plan se trouvant à distance focale f de la caméra, soit $Z = f$. On définit également un point de référence $\mathbf{c}(x_c, y_c)$ dans le plan image comme étant le point d'intersection de l'axe optique et du plan image (Fig.1.14).

En plus du *référentiel-base* (pour rappel, noté, \mathcal{R}_b), s'ajoutent un *référentiel-caméra* noté \mathcal{R}_c , un *référentiel-objet* \mathcal{R}_o , ainsi qu'un *référentiel-image* \mathcal{R}_i . Nous noterons également l_x et l_y respectivement la longueur et la hauteur d'un pixel dont nous aurons besoin pour la suite.

A partir des coordonnées d'un point $\mathbf{P}(X, Y, Z)$ exprimées dans le référentiel de la caméra, les coordonnées projetées sur le plan images sont déduites de la manière suivante :

$$x = f \frac{X}{Z}, y = f \frac{Y}{Z} \quad (1.15)$$

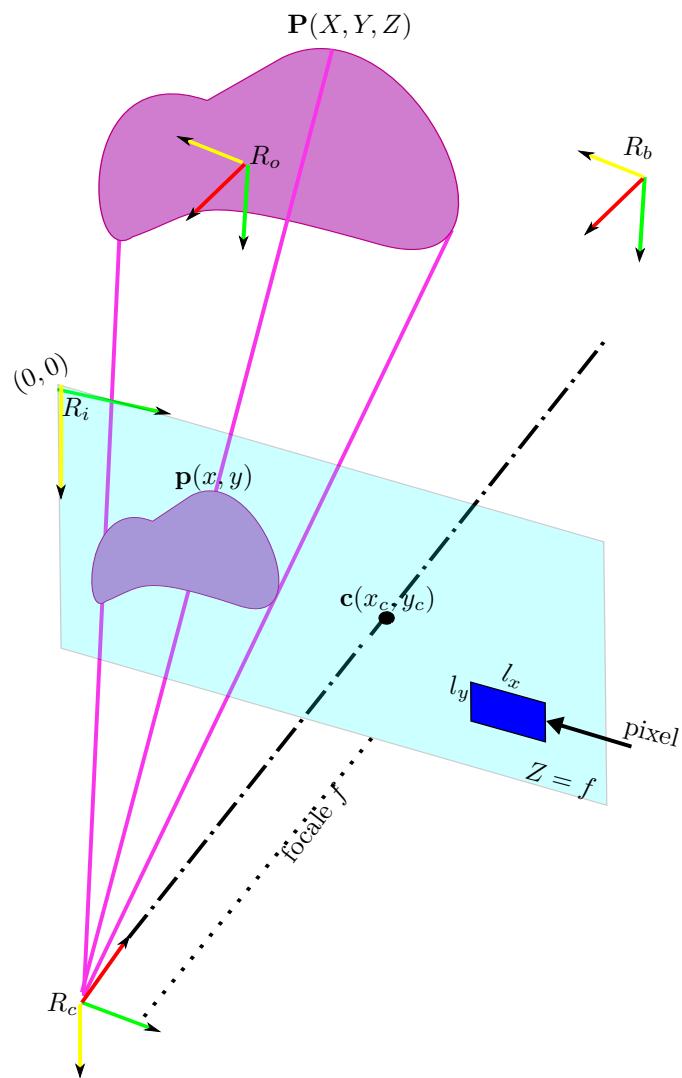
ou, sous forme matricielle :

$$Z \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

soit $\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{A}\mathbf{p}$, avec $\tilde{\mathbf{p}} = Z\mathbf{p}$.

Un point dans l'image est généralement représenté par ses coordonnées pixelliques (l'origine du référentiel étant supposée localisée en haut à gauche de l'image).

La conversion entre les coordonnées métriques (x, y) et les coordonnées pixelliques (x_p, y_p) , se fait selon la relation suivante :

Figure 1.14: Modèle de projection *pinhole*

$$\begin{cases} x_p = x_c + x/l_x \\ y_p = y_c + y/l_y \end{cases} \quad (1.17)$$

ce qui donne sous une forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{l_x} & 0 & x_c \\ 0 & \frac{1}{l_y} & y_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

soit $\mathbf{p}_p = \mathbf{B}\mathbf{p}$.

On obtient la relation suivante entre les coordonnées métriques 3-D du point et les coordonnées pixelliques dans l'image :

$$Z \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & x_c \\ 0 & \alpha_y & y_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

avec $\alpha_x = f/l_x$ et $\alpha_y = f/l_y$. Les paramètres $(\alpha_x, \alpha_y, x_c, y_c)$ de la matrice $K = AB$ ainsi construite sont généralement obtenus par calibration. La matrice K nous permet de faire le lien entre les informations géométriques disponibles dans l'image et la projection de la scène observée. En particulier, nous pouvons à présent définir les coordonnées normalisées ainsi :

$$\begin{cases} x = X/Z \\ y = Y/Z \end{cases} \quad (1.20)$$

indépendantes de la focale, et pouvant être déduites des coordonnées pixelliques en utilisant la matrice K .

Il nous reste à établir une relation entre le référentiel-caméra et le référentiel-objet afin d'établir une correspondance entre les propriétés de la scène réelle et sa projection dans l'image. Pour cela, il suffit de déterminer les paramètres du changement de référentiel.

Soient ${}^c\mathbf{P} = ({}^cX, {}^cY, {}^cZ)$ les coordonnées du point \mathbf{P} exprimées dans le référentiel \mathcal{R}_c et ${}^o\mathbf{P} = ({}^oX, {}^oY, {}^oZ)$ ses coordonnées dans le référentiel \mathcal{R}_o . Le passage d'un référentiel à l'autre est effectué en utilisant la relation ${}^c\mathbf{P} = {}^c\mathbf{t}_o + {}^c\mathbf{R}_o {}^o\mathbf{P}$, avec ${}^c\mathbf{t}_o$ le vecteur 3×1 de translation entre les deux référentiels, ${}^c\mathbf{R}_o$ la matrice 3×3 de rotation correspondant à la rotation des axes du référentiel. En utilisant les coordonnées homogènes $\tilde{\mathbf{P}}$ de \mathbf{P} , il est possible de factoriser cette transformation en une seule opération matricielle :

$${}^c\tilde{\mathbf{P}} = {}^c\mathbf{M}_o {}^o\tilde{\mathbf{P}} \quad (1.21)$$

soit :

$$\begin{bmatrix} {}^cX \\ {}^cY \\ {}^cZ \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^c\mathbf{R}_o & {}^c\mathbf{t}_o \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^oX \\ {}^oY \\ {}^oZ \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

On appelle ${}^c\mathbf{M}_o$ la *matrice homogène de transformation* du référentiel \mathcal{R}_o au référentiel \mathcal{R}_c , dont l'inverse s'exprime simplement sous la forme :

$${}^o\mathbf{M}_c = \begin{bmatrix} {}^c\mathbf{R}_o^T & -{}^c\mathbf{R}_o^T {}^c\mathbf{t}_o \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

Nous sommes dès lors en mesure d'établir une relation entre les propriétés de la scène observée exprimées dans son référentiel propre et sa projection dans l'image, exprimée en coordonnées pixelliques, métriques et généralisées. Le lecteur remarquera cependant que, s'il est possible directement, connaissant \mathbf{K} et ${}^o\mathbf{M}_c$, de déduire à partir des propriétés de la scène les caractéristiques de sa projection, l'opération inverse est dépendante dans ce modèle d'une estimation pour chaque point de sa coordonnée oZ , ce que nous aurons à considérer plus tard.

1.4.2 Configurations et stratégies d'asservissement visuel

Positionnement de la caméra

Nous ne considérons dans la suite que l'utilisation d'une caméra unique dans le cas d'une scène fixe. Le contexte étant celui d'un manipulateur dont on veut asservir la saisie et le déplacement d'un objet, plusieurs stratégies s'offrent à nous. Une première décision à prendre concerne par exemple le positionnement de la caméra. On distingue ainsi une configuration déportée (Fig. 1.15a) d'une configuration embarquée (Fig. 1.15b).

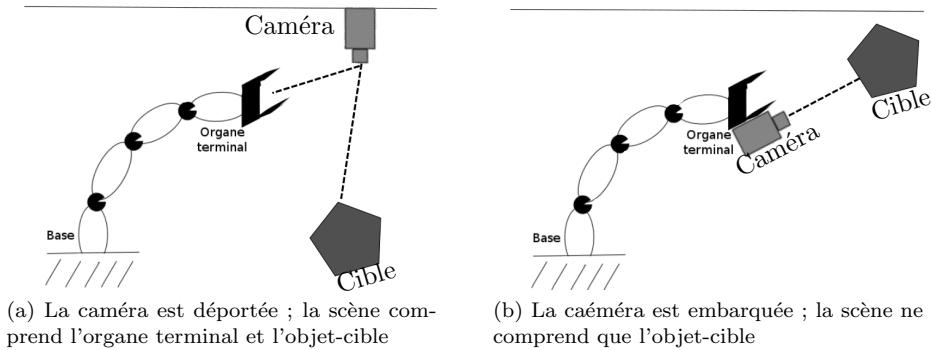


Figure 1.15: Positionnements de caméra

Dans le cas d'une caméra déportée, on connaît les transformations permettant de passer du référentiel-base \mathcal{R}_b au référentiel-caméra \mathcal{R}_c , et du référentiel-caméra au référentiel-objet \mathcal{R}_o . Seul l'organe terminal bouge dans la scène observée. Dans le cas d'une caméra embarquée, la transformation permettant de passer du référentiel de l'organe terminal \mathcal{R}_e au référentiel-caméra \mathcal{R}_c est connue. Toutefois, l'ensemble de la scène est affecté lors d'un déplacement de l'organe terminal (et donc de la caméra).

Asservissements en position, basés images et hybrides

De manière générale, une stratégie d'asservissement visuel peut être décomposée de la manière suivante :

1. on sélectionne dans un premier temps un ensemble s de paramètres à partir desquels on peut estimer soit directement la pose de l'organe terminal, soit le déplacement nécessaire à l'obtention de cette pose. L'ensemble des paramètres dépend d'une part de la valeur des primitives extraites de

l'image et d'autre part d'un ensemble de connaissances *a priori*, telles que les propriétés de la caméra, ou encore un modèle de la cible.

2. on définit ensuite la valeur désirée s^* des paramètres, correspondant à l'état que l'on souhaite atteindre.
3. à partir de données extraites de l'image, on calcule la valeur courante des paramètres
4. on calcule alors une erreur $e = s - s^*$, dont on souhaite qu'elle converge vers 0.
5. on établit enfin une relation entre la variation \dot{e} de l'erreur et la commande qui sera ensuite envoyée au manipulateur.
6. la commande est effectuée, et l'on boucle les étapes 3 à 6 jusqu'à obtention d'une valeur seuil de l'écart entre les valeurs courantes des paramètres et les valeurs désirées.

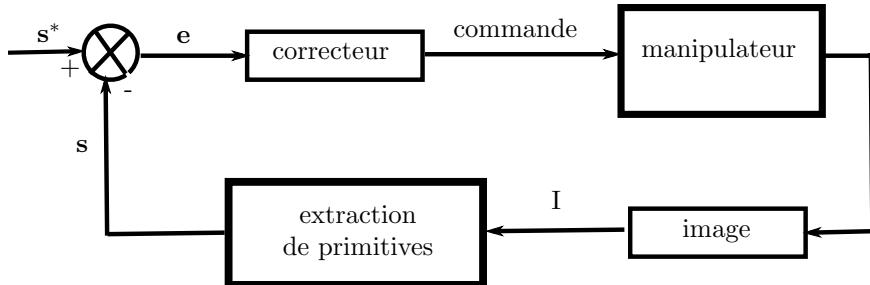


Figure 1.16: Schéma des étapes de l'asservissement visuel

On distinguera ici deux grandes classes de stratégies d'asservissement : la première est basée sur l'estimation des paramètres de pose de l'organe terminal (PBVS : position-based visual servo), tandis que la seconde utilise directement les primitives extraites de l'image (IBPS : image-based visual servo). Il est également possible de mixer ces deux approches, ce que l'on appellera un asservissement hybride.

Dans le cas de l'asservissement en position, une connaissance du modèle 3-D de la cible est nécessaire (on parle d'ailleurs parfois d'asservissement 3-D). De l'écart entre les valeurs courantes d'un ensemble de primitives et leurs valeurs estimées pour une pose désirée, on déduira les paramètres de pose de l'organe terminal. Cela revient à faire varier un référentiel courant de l'organe terminal \mathcal{R}_e vers un référentiel correspondant à la pose prescrite \mathcal{R}_e^* , soit la détermination d'une matrice homogène de transformation ${}^{e^*}M_e$. Comme nous l'avons vu, cette matrice est composée d'une translation et d'une rotation, qui peuvent être décrites à l'aide de 6 paramètres. Dans ce cas, le vecteur s est constitué de mesures permettant de construire cette matrice de transformation de repère. On pourra d'ailleurs noter que dans une configuration avec caméra embarquée, le problème est équivalent à la détermination d'une matrice de transformation ${}^{c^*}M_c$ entre les référentiels courants et désirés de la caméra.

L'asservissement basé-image repose quant à lui sur l'exploitation direct des informations extraites de l'image pour établir la commande qui sera envoyée au

manipulateur. Il ne nécessite pas de connaissance *a priori* du modèle 3-D de l'objet, mais exploite des primitives pour lesquelles on possède un modèle de comportement lorsqu'elles évoluent dans l'espace. On parlera dès lors d'asservissement 2-D, ou d'asservissement 2-D 1/2 lorsque une connaissance du modèle 3-D est néanmoins utilisée (approche hybride).

Quelque-soit la situation, l'objectif de l'asservissement visuel est de traduire un ensemble de mesures effectuées dans une série d'image en loi de commande qui sera envoyée au manipulateur.

Construction d'une loi de commande

Nous reprenons ici les bases de construction d'une loi de commande. Le lecteur les retrouvera développées par exemple dans [5] et [6]. Nous nous contenterons ici d'exposer les principes généraux d'outils que nous avons utilisés tout au long de nos travaux.

Soient \mathbf{s} un ensemble de mesures réalisées au sein de l'image sur des primitives choisies, et \mathbf{s}^* les valeurs désirées de ces mesures. On construit le vecteur $\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}^*$ représentant l'erreur de mesure, soit la différence entre les valeurs courantes et les valeurs désirées.

On choisit ici de construire une loi de commande en vitesse. Soit le torseur cinématique $\mathbf{v}_c = (\nu_c, \omega_c)$, avec ν_c et ω_c les vitesses instantanées respectivement linéaires et angulaires. Il est nécessaire dans un premier temps de déterminer les variations $\dot{\mathbf{s}}$ des mesures pour un déplacement donné \mathbf{v}_c de la caméra. Cette relation, lorsqu'elle existe, prend la forme algébrique d'une matrice $\mathbf{L}_s \in \mathcal{M}_{k \times 6}$ que l'on appelle *matrice d'interaction*, k représentant le nombres de mesures effectuées. A partir de tous ces éléments nous pouvons établir :

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s \mathbf{v}_c \quad (1.24)$$

Notre cible étant fixe, nous avons $\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{s}}$. Nous pouvons dès lors immédiatement déduire de (Equ.1.24) la relation suivante :

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L}_e \mathbf{v}_c \quad (1.25)$$

Nous souhaitons que notre erreur \mathbf{e} de mesure décroisse de manière exponentielle, soit : $\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e}$, λ étant appelé le *gain*, permettant de régler la vitesse de convergence. La loi de commande suivante peut alors être construite :

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \mathbf{L}_e^+ \mathbf{e} \quad (1.26)$$

où $\mathbf{L}_e^+ \in \mathcal{M}_{6 \times k}$ représente la matrice pseudo-inverse de Moore-Penrose, soit $\mathbf{L}_e^+ = (\mathbf{L}_e^T \mathbf{L}_e)^{-1} \mathbf{L}_e^T$. Lorsque $k = 6$ et que $\det \mathbf{L}_e \neq 0$, on pourra choisir d'utiliser la loi $\mathbf{v}_c = -\lambda \mathbf{L}_e^{-1} \mathbf{e}$.

En pratique, il est difficile de connaître avec exactitude \mathbf{L}_e , qui peut être dépendante de la pose de la caméra. On utilisera dès lors une approximation de la matrice d'interaction, la loi de commande finale devenant :

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \widehat{\mathbf{L}_e^+} \mathbf{e} \quad (1.27)$$

Toutes les fois où cela est possible, on préférera utiliser des primitives dont la matrice d'interaction correspondante exhibe des propriétés algébriques intéressantes (triangulaire, inversible, ...). Le choix préalable des primitives obéit donc à un double impératif :

- on attend qu'elles soient aisément identifiables dans l'image et que les mesures puissent être réalisées de manière robuste
- les caractéristiques de la matrice d'interaction qu'elles complètent doivent comporter des qualités algébriques qui permettront d'améliorer les calculs tout autant que de ne pas propager les erreurs de mesures sur une primitive particulière aux autres mesures.

1.4.3 Contexte de l'étude et choix de stratégie pour l'asservissement visuel

Nous avons vu que l'utilisation d'un robot parallèle à câbles nous permet d'évoluer dans un espace de travail conséquent. En particulier, le robot **Marionet-Assist** que nous avons utilisé pour nos expérimentations évolue dans un cube de $4m \times 3m \times 3m$, et le volume atteignable par un robot de type **Marionet-Crane** peut aller jusqu'à $100m \times 35m \times 35m$. Dans ces circonstances, l'utilisation d'une caméra embarquée a été privilégiée pour deux raisons :

- le champs de vision d'une seule caméra fixe déportée pourra se révéler insuffisant pour couvrir l'ensemble de l'espace de travail
- le déploiement d'un robot à câble pouvant être effectué dans des milieux nocifs, ou difficilement atteignables (suite par exemple à une catastrophe naturelle), l'utilisation d'une caméra déportée est souvent difficilement envisageable.

Ajoutons que le robot **Marionet-Assist** a été pensé pour être utilisé dans des pièces de vie de personnes à la mobilité fragilisée. Dans ce cadre, une caméra déportée peut paraître inutilement intrusive. Le champs de vision d'une caméra embarquée étant limité, cela nous a semblé, conformément à cette application, un choix plus respectueux de l'intimité des personnes.

De la même manière, les environnements d'utilisation des robots à câbles de la famille **Marionet** sont généralement dynamiques. A ce titre, nous avons privilégié une stratégie d'asservissement basé-image, à nouveau pour deux raisons distinctes :

- elle ne nécessite pas une connaissance complète du modèle 3-D de la cible
- l'asservissement en position repose souvent sur l'utilisation de plusieurs caméras (ou de capteurs de type RGB-D) pour garantir une mesure fiable des primitives permettant une reconstruction du modèle 3-D de la cible. Or, pour des raisons toujours liées au contexte d'application des robots de la famille **Marionet**, cela ne correspond pas aux choix de capteurs que nous avons effectués

Enfin, il était envisageable dans cette étude d'utiliser les caméras soit comme capteur intéroceptif, soit comme capteur extéroceptif. Le choix d'une observation des articulations d'un robot parallèle à câbles a été effectué par [2] pour des robots parallèles classiques, et plus récemment pour des robots parallèles à câble [9], [8]. Ces études correspondant à ce jour au principal travail effectué dans le domaine de l'asservissement visuel des robots parallèles à câbles, nous reviendrons dès lors dessus à l'occasion de la section suivante, au sein de laquelle

nous définirons nos problématiques et pistes de travail. Nous pouvons relever toutefois que la démarche développée dans leurs recherches consiste à améliorer le positionnement de l'organe terminal, ce qui suppose que la position de la cible est connue avec suffisamment de précision. Il s'agit donc d'un environnement contrôlé. Or, le contexte d'application de nos robots implique au contraire une incertitude non-négligeable sur les propriétés de la cible. Dès lors, la caméra est tout autant utilisée pour la construction d'une loi de commande que pour la localisation de l'objet et l'actualisation de ses propriétés lorsque celles-ci diffèrent d'une première estimation. Le choix d'utilisation des caméras comme capteurs extéroceptifs s'est donc imposé dans notre approche.

Il nous reste en introduction à présenter les avantages et les spécificités d'une utilisation de l'asservissement visuel dans le contexte particulier des robots parallèles à câbles. La section suivante introduira les pistes d'amélioration de contrôle que nous avons repérées, les problématiques auxquelles nous avons été confrontées et la manière dont nous proposons de les résoudre. Nous évoquerons également de quelle manière les spécificités des robots parallèles nous permettent d'assouplir les contraintes de l'asservissement tout en garantissant un contrôle optimal.

1.5 Asservissement visuel des robots parallèles à câbles

Nous avons vu que plusieurs caractéristiques des robots parallèles à câbles peuvent altérer la qualité de la manipulation. Ainsi, la complexité des modèles géométriques et cinématiques par rapport aux robots séries et aux robots parallèles rigides menace d'une part la précision des opérations de manipulation lors de la résolution numérique, et d'autre part l'effectuation en temps réel. De plus, la nécessaire vérification de l'équilibre statique pour toutes les configurations de câbles en tension strictement positive impacte également la contrainte de réalisation en temps réel d'une tâche ; surtout, il est tout autant difficile de prévoir quels câbles seront en tension lors d'un déplacement prescrit, que de garantir la constance du caractère positif ou nul de la tension d'un câble sur l'intégralité d'un déplacement. Enfin, les incertitudes mécaniques – telles par exemple le diamètre réel de la couche d'enroulement d'un câble autour des tambours – ont également une influence sur la précision du manipulateur.

Il est donc nécessaire, afin de garantir l'efficacité d'une tâche de manipulation, de simplifier la résolution numérique des modèles, de développer une stratégie de contrôle de la tension dans les différents câbles, et de corriger enfin la trajectoire du manipulateur lorsque les incertitudes et erreurs perturbent celle-ci.

L'utilisation de capteurs supplémentaires a été proposée à de nombreuses reprises afin de résoudre un ou plusieurs des problèmes énoncés. Dans le contexte des robots parallèles à jambes rigides, plusieurs suggestions ont été faites :

- mesurer directement la pose de l'organe terminal à l'aide de systèmes de lasers et miroirs [?], [?] ou d'une caméra déportée [?], [?] : cela permet tout autant une simplification des modèles qu'une correction des erreurs et imprécisions.
- utiliser des capteurs proprioceptifs afin d'obtenir une représentation fidèle

de l'état des variables articulaires [?], [?], ce qui permet également une simplification des modèles pouvant aboutir à une exécution en temps réel.

- un contrôle référencé vision basé sur l'exploitation de mesures des directions des jambes du robot [2] : dans cette dernière méthode, une stratégie IBVS est utilisée pour définir un contrôle cinématique. Elle permet de s'affranchir du calcul du MGD, ce qui la rend *a priori* robuste aux erreurs de modèles et de calibrations.

En particulier, cette dernière méthode a été déclinée récemment pour le contrôle de robots parallèles à câbles. Elle fait suite à une première approche [?] consistant à mettre dans un premier temps en place un asservissement visuel 3-D (PBVS) sur l'organe terminal, puis à élaborer un schéma de contrôle dynamique utilisant la vision pour estimer la pose et la vitesse de la plate-forme. Malgré des résultats prometteurs obtenus en simulation, il reste à valider cette approche sur un prototype réel.

Les mêmes auteurs ont donc par la suite proposé une approche analogue au suivi de jambes des robots parallèles classiques [8], en exploitant cette fois-ci les directions de départs des câbles, complétant ainsi un système de mesures utilisant des capteurs de forces (afin d'estimer la tension dans les câbles), ainsi que plusieurs caméras déportées pour estimer la pose de la plateforme. Le schéma d'ensemble utilise donc un premier ensemble de quatre caméras filmant un motif sur l'organe terminal pour proposer un asservissement 3-D donnant le torseur cinématique de l'organe terminal, puis quatre caméras stéréos donnant la direction tangente aux départs de câbles, permettant ainsi de simplifier le contrôle cinématique du robot. A nouveau, les résultats présentés en simulation nous paraissent tout-à-fait prometteurs, mais doivent encore à notre connaissance être validés expérimentalement.

Nous avons toutefois choisi de ne pas poursuivre dans la même voie pour les trois raisons suivantes :

- pour des raisons d'intrusivité et de coût propres aux conditions d'applications des prototypes sur lesquels nous avons travaillé, le dispositif de mesure nous a paru trop conséquent ; nous avons de plus privilégié des configurations embarquées comme mentionné précédemment.
- bien qu'ils fassent durant leurs travaux l'hypothèse de câbles non-élastiques, les auteurs supposent une précision des mesures de tension qui nous semble difficilement atteignable pour des robots de cette envergure. Il ne s'agissait évidemment pas du sujet de leur étude, mais nous pensons néanmoins que certaines situations que nous avons rencontrées pourraient affecter la qualité des résultats annoncés.
- enfin, le schéma de contrôle repose sur l'estimation et l'inversion de la matrice d'interaction d'une part, et sur l'estimation de la Jacobienne inverse d'autre part, se présentant donc sous la forme :

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \widehat{\mathbf{J}}^{-1} \widehat{\mathbf{L}}_e^+ \mathbf{e} \quad (1.28)$$

Nous pensons qu'il est possible d'unifier ces deux étapes à la condition d'exécuter un contrôle cinématique à l'aide d'une caméra embarquée, soit une seule matrice :

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \widehat{\mathbf{K}} \mathbf{e} \quad (1.29)$$

1.5. ASSERVISSEMENT VISUEL DES ROBOTS PARALLÈLES À CÂBLES29

ne nécessitant pas plus de connaissance précise de la pose X que des valeurs des variables articulaires ρ .

Bien que nous ne puissions garantir que cette simplification du schéma de contrôle puisse s'appliquer à toutes les configurations de robots à câbles, elle s'avère efficace dans notre contexte, particulièrement pour les robots $N - 1$. Sa mise en place implique toutefois certaines conditions qui peuvent se révéler incompatibles avec un ensemble d'applications, ce que nous exposerons lors du chapitre qui sera consacré à son étude.

Le travail qui est présenté ici a pour objectif d'améliorer la qualité de manipulation d'un robot parallèle à câbles. Pour cela, nous avons distingué quatre critères qui nous permettront d'évaluer notre contribution, à savoir :

1. la **stabilité** de la plate-forme lors d'un déplacement
2. la **précision** de la pose finale
3. la **robustesse** aux imprécisions et erreurs de modèle, aux erreurs et imprécisions des estimations des paramètres de contrôle
4. la **simplicité** du schéma de contrôle

Dans ce but, nos travaux seront présentés de la manière suivante :

1. dans un premier temps, nous présenterons une stratégie de contrôle des câbles en tension, qui nous permettra d'améliorer la stabilité des mouvements, ainsi que la précision des déplacements.
2. une fois cette stabilité assurée, nous montrerons que l'utilisation d'un asservissement visuel améliore la précision du positionnement de l'organe terminal, mais également la robustesse du contrôle
3. nous utiliserons ensuite les spécificités des architectures parallèles pour développer une loi de contrôle simplifiée, ce qui nous permettra de gagner ici en robustesse et en simplicité de calcul.
4. enfin, un chapitre présentera plusieurs simulations et expérimentations sur notre prototype. Ceci nous permettra de valider nos différentes approches, mais également d'en présenter les limites, ce qui nous permettra en conclusion de faire le point sur les perspectives s'ouvrant en continuité de ces travaux.

Bibliography

- [1] J. Albus, R. Bostelman, and N. Dagalakis. The nist spider, a robot crane. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 97(3):373–385, may 1992.
- [2] Nicolas Andreff, Tej Dallej, and Philippe Martinet. Image-based visual servoing of a gough—stewart parallel manipulator using leg observations. *Int. J. Rob. Res.*, 26(7):677–687, July 2007.
- [3] M. Carricato and J-P. Merlet. Geometrico-static analysis of underconstrained cable-driven parallel robot. In *ARK*, pages 309–320, Piran, 28 june – 1 july 2010.
- [4] M. Carricato and J.P. Merlet. Stability analysis of underconstrained cable-driven parallel robots. *Robotics, IEEE Transactions on*, 29(1):288–296, Feb 2013.
- [5] François Chaumette and S. Hutchinson. Visual servo control, Part I: Basic approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(4):82–90, 2006.
- [6] François Chaumette and S. Hutchinson. Visual servo control, Part II: Advanced approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1):109–118, 2007.
- [7] R. Clavel. Delta, a fast robot with parallel geometry. In *18th Int. Symp. on Industrial Robots (ISIR)*, pages 91–100, Lausanne, 26-28 april 1988.
- [8] T. Dallej, N. Andreff, Y. Mezouar, and P. Martinet. 3d pose visual servoing relieves parallel robot control from joint sensing. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 4291–4296, Oct 2006.
- [9] T. Dallej, M. Gouttefarde, N. Andreff, R. Dahmouche, and P. Martinet. Vision-based modeling and control of large-dimension cable-driven parallel robots. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1581–1586, Oct 2012.
- [10] T. Dallej, M. Gouttefarde, N. Andreff, M. Michelin, and P. Martinet. Towards vision-based control of cable-driven parallel robots. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2855–2860, Sept 2011.

- [11] Tej Dallej, Marc Gouttefarde, Nicolas Andreff, Micaël Michelin, and Philippe Martinet. Towards vision-based control of cable-driven parallel robots. In *IROS*, pages 2855–2860. IEEE, 2011.
- [12] Olivier Faugeras. *Three-dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1993.
- [13] C. Gosselin and J. Angeles. The optimum kinematic design of a spherical three-degree-of-freedom parallel manipulator. *J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 1989.
- [14] V.E. Gough. Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance, 1956-1957. Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng.
- [15] Theo A. G. Heeren and Frans E. Veldpaus. An optical system to measure the end effector position for on-line control purposes. *Int. J. Rob. Res.*, 11(1):53–63, February 1992.
- [16] W.F. Marantette. Machine tool position measurement employing multiple laser distance measurements, February 7 1995. US Patent 5,387,969.
- [17] J. P Merlet. Kinematics of the wire-driven parallel robot marionet using linear actuators. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 3857–3862, May 2008.
- [18] Jean-Pierre Merlet. Closed-form resolution of the direct kinematics of parallel manipulators using extra sensors data. In *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, Georgia, USA, May 1993*, pages 200–204, 1993.
- [19] J.P. Merlet. *Les robots parallèles*. Collection robotique. Hermès, 1997.
- [20] A. Ming and T. Higuchi. Study on multiple degree of freedom positioning mechanisms using wires, part 2, development of a planar completely restrained positioning mechanism. *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, 28(3):235–242, september 1994.
- [21] Flavien Paccot, Philippe Lemoine, Nicolas Andreff, Damien Chablat, and Philippe Martinet. A vision-based computed torque control for parallel kinematic machines. *CoRR*, abs/0810.2666, 2008.
- [22] V. Parenti-Castelli and R. Di Gregorio. A new algorithm based on two extra sensors for real-time computation of the actual configuration of the generalized stewart-gough manipulator. *ASME J. of Mechanical Design*, 122(3):294–298, september 2000.
- [23] D. Stewart. A platform with 6 degrees of freedom. *Proc. of the Institution of mechanical engineers*, 180(Part 1, 15):371–386, 1965.