

Chapitre 1

Les robots parallèles à câbles

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, les robots parallèles à câbles. Deux objectifs animent ce travail : il s'agit dans un premier temps de perfectionner les fonctionnalités de saisie et manipulation d'objets de ces robots, et d'en améliorer les 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 d'un rappel de leurs modèles géométriques et cinématiques. Nous présentons ensuite dans une troisième section la classe des manipulateurs de type N-1, à laquelle appartient le prototype sur lequel nous avons effectué nos expérimentations et validations, et dont nous donnerons les principales propriétés.

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 apprécier. 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.

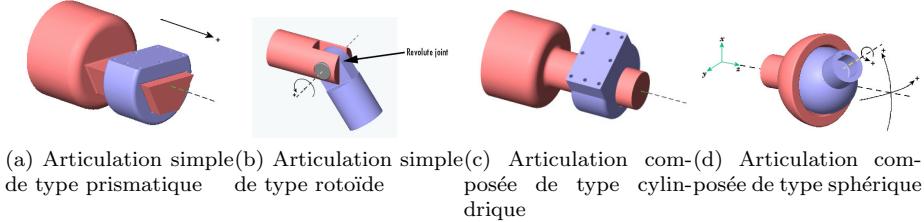


Figure 1.1: Différents exemples d'articulations.

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) [21]. Les chaînes cinématiques complexes sont constituées de plusieurs chaînes fermées et/ou ouvertes.

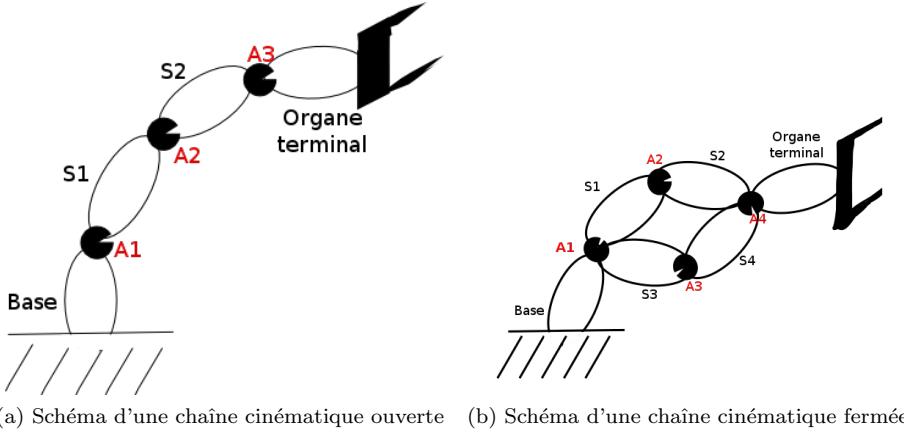


Figure 1.2: Exemples de chaînes cinématiques ouvertes et fermées : les S_i représentent les différents segments intermédiaires, tandis que les A_i correspondent aux articulations. Dans Fig.1.2a, tous les segments S_i ont un degré de connexion égal à 2 ; seuls la base et l'organe terminal ont un degré de connexion égal à 1. On peut voir au contraire dans Fig.1.2b que tous les segments S_i – à l'exception donc de la base et de l'organe terminal – 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.

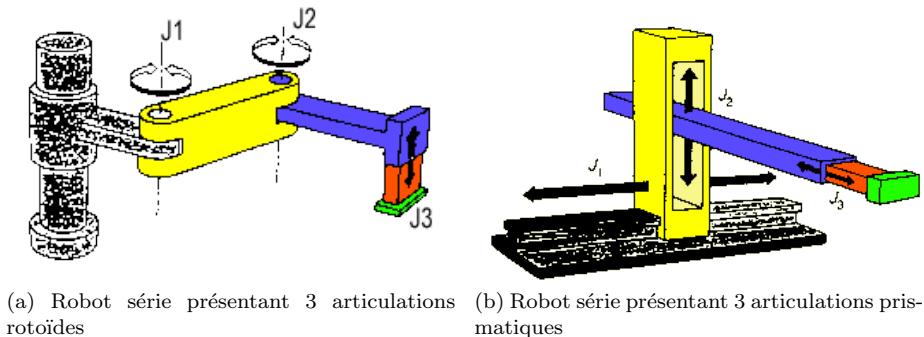


Figure 1.3: Exemples de robots séries (type SCARA et cartésien)

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 élevées, en raison des sollicitations en flexion sur les segments et de l'effet de bras de levier sur les premiers segments.

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

Constituées de plusieurs chaînes cinématiques fermées, les architectures parallèles présentent une alternative efficace aux limites des robots séries. Leurs caractéristiques, sur lesquelles nous allons à présent nous pencher, 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 [34] :

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 [22], [43] (Fig.1.4a,1.4b) et le robot Delta [13] (Fig.1.4c).

Initialement développée pour des applications liées à 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 rototoïde à un levier, lui-même relié à un parallélogramme par une seconde articulation rototoïde, une troisième articulation rototoïde 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.

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,



(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

- une rigidité 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 par les limites de variation des variables articulaires. A titre d'exemple, la variation d'altitude d'une plate-forme de Gough-Stewart ne peut excéder la course des actionneurs linéaires des jambes.

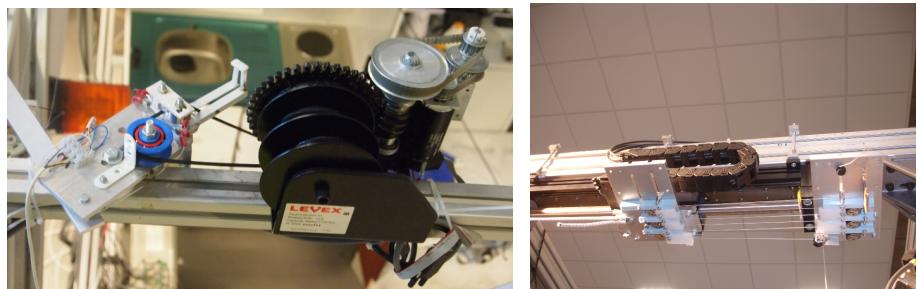
L'architecture des robots parallèles à câbles que nous allons présenter dans la section suivante a été proposée dans le but de s'affranchir de la contrainte de limitation de l'espace de travail, qui est une contrainte forte des mécanismes parallèles [2], [25]. L'intégralité des travaux présentés dans 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 plate-forme 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 [30].



(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

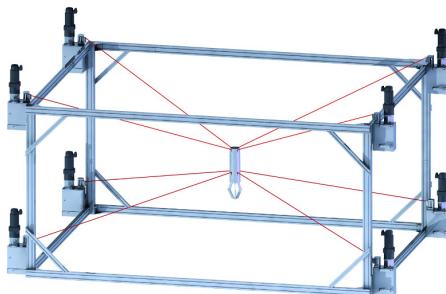
Figure 1.5: Deux types d'articulations et d'actionnement pour un robot à câble

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*, [33] Fig.1.9a).

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 plate-forme*. 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 [36]. 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 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*. A titre d'exemple, le manipulateur *Nist Spider* [1] présente une configuration suspendue.
- 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.



(a) Exemple de configuration pleinement contrainte



(b) Exemple de configuration suspendue

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

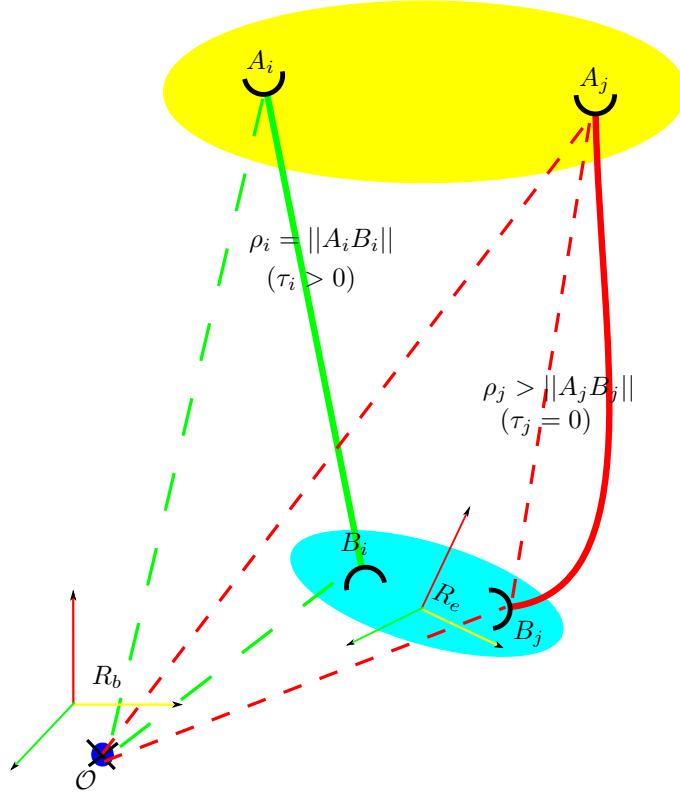
Une caractéristique particulière des manipulateurs parallèles à câbles qui les différencie des manipulateurs parallèles classiques est la **non-rigidité des jambes**. Sous certaines conditions, un ou plusieurs câbles peuvent être détendus, ce qui a pour effet qu'ils n'exercent plus de force sur la plate-forme.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

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

- 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 agrandi par rapport aux robots parallèles à jambes rigides
- l'équipage mobile est très léger, ce qui favorise la dynamique
- le comportement des câbles (non-déformables, élastiques, pesants, ...) peut complexifier sérieusement le modèle du robot
- 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 \mathbf{J}^{-1} pour exprimer la jacobienne inverse, et \mathbf{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 plate-forme \mathbf{B}_i . Dans le cas où le câble est détendu, la longueur sera supérieure à cette distance (Fig.1.7a).

Nous partons donc des relations suivantes :

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

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

Comme on le voit, il n'est pas possible d'obtenir les longueurs ρ_i sans prendre en compte les tensions τ_i . Dès lors, tout comme dans l'approche développée par [8], 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 :

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

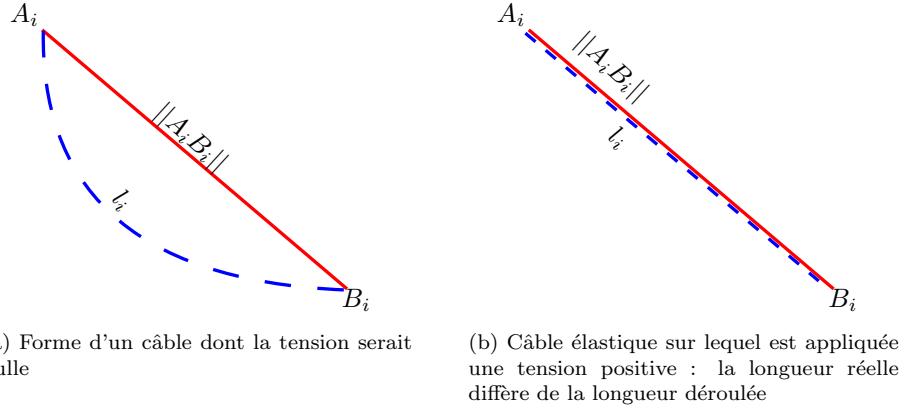


Figure 1.7: Dans le cas d'un câble détendu (tension nulle), la longueur déroulée (en bleu pointillé) sera supérieure à la distance entre les deux points d'attache (en rouge plein) ; de plus, la forme du câble sera telle qu'il y a risque d'intersection avec d'autres câbles, l'environnement, Dans le cas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

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 plate-forme 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 plate-forme au point \mathbf{B}_i exerce une force sur la plate-forme 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 plate-forme :

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

où p_i est un vecteur allant d'un premier point de référence arbitraire C localisé sur la plate-forme au point \mathbf{B}_i . La force exercée par le câble sur la plate-forme est alors $\tau_i \mathbf{W}_i$, où τ_i est un scalaire positif représentant l'intensité de la tension.

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 :

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

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

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

soit

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

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 plate-forme, on veut en déduire les longueurs supposées ρ_i des câbles : c'est le modèle géométrique inverse. Dans le cas où nous avons $m \geq 6$ câbles, connaissant la pose \mathbf{B} et les points de sorties \mathbf{A}_i , on peut calculer les longueurs ρ_i . Si $m = 6$, la solution de l'équilibre statique est unique, l'équilibre statique possède sinon en théorie une infinité de solution (nous ne devons toutefois considérer que les ensembles de solutions pour lesquelles les τ_i sont tous strictement positifs).

Il est cependant nécessaire d'envisager les possibilités pour lesquelles moins de 6 câbles sont en tension. Nous avons dès lors $m < 6$, et nous ne pouvons donc plus spécifier que m degrés de libertés : il faut alors faire intervenir la statique afin de calculer les $6 - m$ degrés de liberté. Plusieurs méthodes s'offrent à nous, dont :

- par résolution inverse de l'équilibre statique, on élimine les τ correspondant aux câbles mous, puis on reporte dans les équations du modèle géométrique inverse, ce qui nous donne $6 - m$ équations.
- L'équilibre statique est vérifié uniquement si l'ensemble des déterminants $m + 1 \times m + 1$ de la matrice \mathbf{W} sont nuls [9]. 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 plate-forme (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 [34], et nous allons voir qu'il peut être plus complexe dans le cas des CDPR.

On distinguera les cas suivants :

- $m > 6$: dans le cas où nous avons $m > 6$ câbles, les inconnues sont les 6 paramètres de pose de \mathbf{X} . Nous avons $6 > m$ équations fournies par le modèle géométrique. Le système à résoudre ne possède cependant en général aucune solution : on en déduit alors qu'un ou plusieurs câbles sont mous, ce que l'étude de l'équilibre statique nous permettront de vérifier. On cherche alors les solutions valides pour $m - 1$ câbles.
- $m = 6$: cette situation peut être ramenée à son équivalent pour les robots parallèles classiques ; dans ce cas, les équations géométriques et celles de la statique sont découpées. La géométrie nous donne les poses \mathbf{X} , et on vérifie la validité de celles-ci avec la statique.
- $m < 6$: ici, nous avons 6 inconnues (les paramètres de pose \mathbf{X}). Or, le modèle géométrique ne fournit que $m < 6$ équations. On complètera dès lors le système avec les équations de l'équilibre statique. Dans cette nouvelle situation, nous avons $6 + m$ inconnues (6 paramètres de pose et m tensions) pour $6 + m$ équations (dont m sont fournies par le modèle

géométrique et m par l'équilibre statique). On obtient alors bien un système carré, mais dont le nombre d'équations est très supérieur à son équivalent pour les robots parallèles à jambes rigides. Dans le cas $m = 5$, on a en effet 11 équations pour les robots parallèles à câbles, contre 5 pour les robots parallèles rigides. Toutefois, le système de $n + 6$ équations à $n + 6$ inconnues ainsi obtenu n'est valide qu'à la condition que tous les câbles soient tendus, soit que $\forall i \in [0, m], \rho_i = \|\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i\|$. On ne peut jamais exclure que la plate-forme soit dans une pose pour laquelle $\exists i \in [1, m], \rho_i > \|\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i\|$. Dans ce cas, une des équations du modèle géométrique ne sera plus valide. Il faut donc considérer tous les cas avec $6 + m - p$ équations ($p \in [1, m - 1]$) et vérifier p fois la validité des résultats ($\rho_i > \|\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i\|, \tau_i > 0$).

Ce qui doit être retenu ici 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 articulaires $\dot{\Theta}$ et la vitesse (translation et angulaire) de la plate-forme Ω .

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

- connaissant la pose de la plate-forme 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 :

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

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) :

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

En différentiant (Equ.1.10), on obtient :

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

soit :

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

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

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

Toutefois, le vecteur $\dot{\mathbf{X}}$ ainsi déterminé ne correspond pas à Ω , il dépend de la paramétrisation choisie pour les paramètres de pose. En particulier, si nous utilisons les angles d'Euler pour paramétriser l'orientation de la plate-forme, nous pouvons exprimer la vitesse d'un point \mathbf{B} en fonction de la vitesse d'un point \mathbf{C} de référence de la plate-forme avec la relation suivante :

$$\mathbf{v}_B = \mathbf{v}_C + \mathbf{B}\mathbf{C} \times \boldsymbol{\omega}_c \quad (1.14)$$

où \mathbf{V}_C dénote la vitesse de la plate-forme au point \mathbf{C} , et $\boldsymbol{\omega}_c$ le vecteur des vitesses angulaires.

Ainsi, comme \mathbf{A}_i est fixé, nous avons pour le câble i :

$$\dot{\mathbf{A}}_i \dot{\mathbf{B}}_i = \mathbf{v}_C + \mathbf{B}_i \mathbf{C} \times \boldsymbol{\omega}_c \quad (1.15)$$

En posant :

$$\dot{\mathbf{X}} = \frac{\mathbf{V}_C}{\boldsymbol{\omega}_c} \quad (1.16)$$

nous construisons ainsi une relation entre les vitesses articulaires et les vitesses de translation et d'orientation, ces dernières paramétrées par les angles d'Euler.

La matrice \mathbf{J}^{-1} ainsi construite est appelée *Jacobienne inverse paramétrée* par les angles d'Euler. On notera qu'elle dépend à la fois des paramètres de pose et des coordonnées articulaires : il requiert dès lors la résolution des modèle géométriques direct et inverse.

1.3 Les robots N-1

On parle de configuration N-1 pour un robot parallèle à câbles en configuration suspendue lorsque l'ensemble des câbles sont reliés à la plate-forme en un même point \mathbf{B} . Cette architecture présente les caractéristiques suivantes :

- puisque l'ensemble des points \mathbf{B}_i sont confondus, le contrôle en orientation n'est plus possible : c'est donc une architecture dédiée aux déplacements en translation. Entre autres avantages, nous n'avons plus à nous préoccuper des interférences entre câbles.
- si $N > 3$, seuls trois câbles au plus seront en tension positive et permettront de contrôler les déplacements de la plate-forme ; le cas N-4 sera expliqué en détail à l'occasion du chapitre consacré aux configurations de câbles.

- les tensions n'étant réparties qu'entre au plus trois câbles, l'ajout de câbles supplémentaires ne peut servir à soulager les autres câbles. Par contre, il est possible d'envisager de choisir le meilleur triplet en fonction d'un critère donné, parmi tous ceux que l'utilisation de $N > 3$ câbles rend possible (4 triplets au plus pour 4 câbles, 10 pour 5 câbles, 20 pour 6 câbles, ···). De plus, l'utilisation de câbles supplémentaires permet d'augmenter l'espace de travail du robot, lorsque le point d'attache du câble ajouté est placé en dehors de celui-ci.

1.3.1 Modèles géométriques

MGSD :

Soient N câbles dont nous connaissons les longueurs $\rho_0, \dots, \rho_{N-1}$. Puisque nous n'avons que 3 câbles au plus en tension, nous commençons par résoudre le modèle géométrique pour chaque triplet de câbles. Ne contrôlant pas les rotations, les paramètres de pose sont uniquement les coordonnées dans l'espace. Dès lors, nous avons 3 inconnues, et 3 équations. Les solutions fournies par la résolution du système seront ensuite validées par l'étude de l'équilibre statique. S'agissant des points d'intersections de trois sphères de centre \mathbf{A}_i et de rayon ρ_i , il y aura au maximum deux solutions pour chaque triplet de câbles, dont une au moins ne respectera pas l'équilibre statique. Il y a donc pour chaque triplet de câbles au plus une pose valide 1.8.

Il faut ensuite vérifier que nous n'ayons pas une pose valide avec moins de 3 câbles en tension : dans ce cas, nous avons deux équations données par la géométrique, pour les trois inconnues que constituent les paramètres de poses. En complétant avec la statique qui nous donne 3 équations pour deux inconnues qui sont les tensions dans les deux câbles testés. Toutefois, les trois équations de la statique seront linéairement dépendante. On ajoutera donc une dernière équation de contrainte stipulant que la pose doit se trouver sur la projection verticale de la droite issue des points \mathbf{A}_i et \mathbf{A}_j testés. On procèdera enfin de même pour l'étude des cas à un seul câble en tension positive.

MGSI :

Le modèle géométrico-statique indirect est relativement simple dans ce contexte. Connaissant les paramètres de pose, les longueurs de câbles peuvent être immédiatement déduite à partir de la relation

$$\rho_i = \|\mathbf{A}_i B\|^2 \quad (1.17)$$

La solution ainsi déterminée est unique du point de vue de sa localisation dans l'espace, mais peut correspondre à plusieurs situations de triplets de câbles en tension.

Cinématique :

Si nous dérivons la relation précédente 1.17, nous avons :

$$2\rho_i \partial \rho = 2x \partial x + 2y \partial y + 2z \partial z \quad (1.18)$$

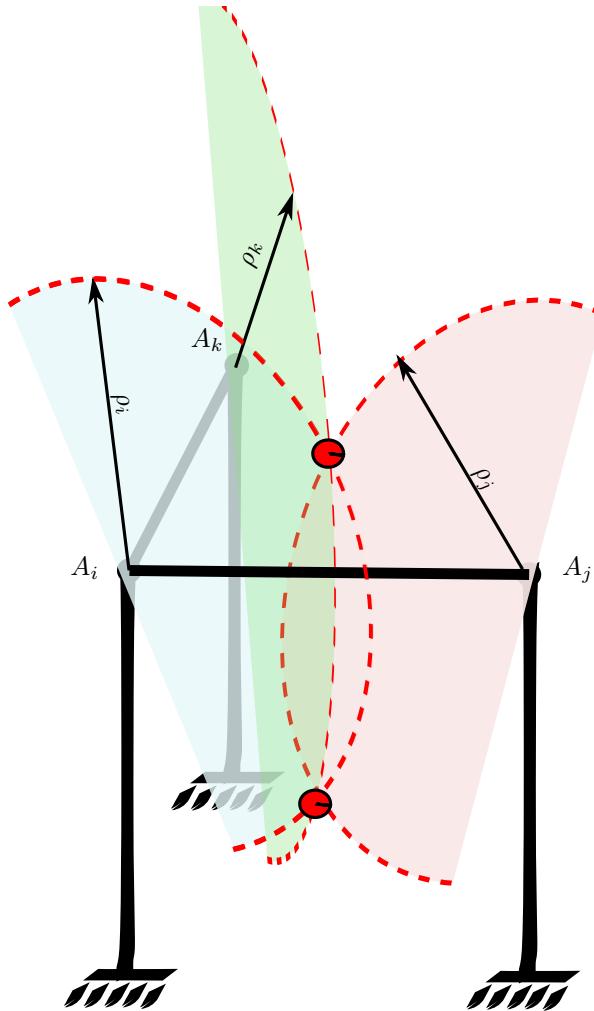


Figure 1.8: Représentation des points d'intersection des trois sphères de centre \mathbf{A}_i (resp. \mathbf{A}_j , \mathbf{A}_k) et de rayon ρ_i (resp. ρ_j , ρ_k). Dans ce cas précis, la solution la plus haute est haut-dessus du plan contenant les points \mathbf{A}_i , \mathbf{A}_j et \mathbf{A}_k : elle ne peut se retrouver en équilibre statique, aucun câble ne pouvant fournir une force opposée à la force de gravité.

avec $\mathbf{A}_i \mathbf{B} = \mathbf{X}_i = (x, y, z)$.

Dès lors, on obtient :

$$\partial\rho = \frac{x}{\rho}\partial x + \frac{y}{\rho}\partial y + \frac{z}{\rho}\partial z \quad (1.19)$$

On en déduira pour le câble i la ligne correspondante de la matrice Jacobienne inverse :

$$\mathbf{J}_i^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{B}_x - \mathbf{A}_{ix}}{\rho_i} & \frac{\mathbf{B}_y - \mathbf{A}_{iy}}{\rho_i} & \frac{\mathbf{B}_z - \mathbf{A}_{iz}}{\rho_i} \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

1.3.2 Marionet-Assist

Les **Marionet** sont une classe de robots à câbles développés par l'EPI Hephaistos pour des applications diverses [31] :

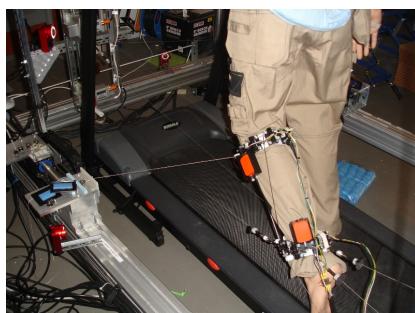
- **Marionet-Crane** (Fig.1.9a) : intervention à grande échelle pour des opérations de sauvetage dans des situations de catastrophe naturelle
- **Marionet-VR** (Fig.1.9b) : utilisation en dans des environnements de réalité virtuel en tant que générateur de mouvement et comme interface haptique.
- **Marionet-Rehab** (Fig.1.9c) : 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.1.9d) : pédagogie et diffusion ; ces robots sont utilisés entre autres pour illustrer de manière ludique des propriétés géométriques et mathématiques auprès des publics jeunes



(a) **Marionet-Crane** : son espace de travail peut aller jusqu'à $15m \times 15m \times 15m$, et la légèreté de son équipement garantit un déploiement rapide



(b) **Marionet-VR** : utilise des actionneurs linéaires pour une précision accrue dans un espace de travail de $6m \times 5m \times 3m$



(c) **Marionet-Rehab** : utilise des actionneurs linéaires pour de la mesure de mouvements (mode passif) et des tâches de réhabilitation (mode actif)



(d) **Marionet-School** : aisément transportable et déployable, il est utilisé pour des interventions pédagogiques

Figure 1.9: Exemples d'utilisation des robots **Marionet**

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 :

- soutien ponctuelle au déplacement pour une personne âgée expérimentant une fatigue articulaire (par exemple pour la passage de la baignoire) (Fig.1.10a)
- aide au transfert d'une position à une autre pour une personne (des toilettes au fauteuil par exemple) (Fig.1.10b)
- aide aux aidants pour le transfert de personnes atteintes de tétraplégie (déplacement du lit vers un fauteuil par exemple) afin de réduire la pénibilité de leur tâche. (Fig.1.10c)

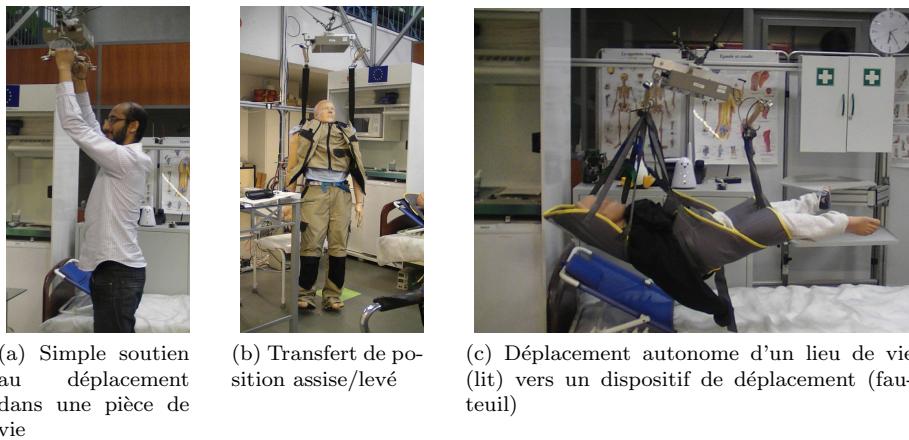


Figure 1.10: Différents types de fragilités motrices dans des situation de la vie quotidienne

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
- 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 plate-forme.

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.1.13a,1.13b) situé dans les locaux de l'INRIA. Les câbles permettant le contrôle de la plate-forme sont fixés au 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 plate-forme :

- 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.1.11a).
- les câbles sont attachés en un même point à la plate-forme : il est possible à partir de 3 câbles de contrôler les déplacement en translation de la plate-forme, mais plus son orientation ; 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.1.11b).
- certains câbles seulement sont attachés en un même point sur la plate-forme. 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 plate-forme en un point B_1 , cette configuration sera notée 4-3-1 (Fig.1.11c).

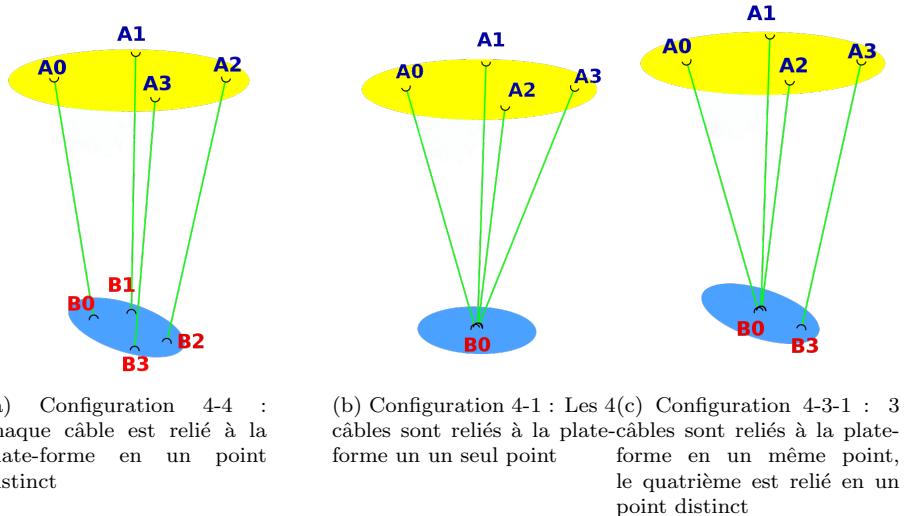


Figure 1.11: Exemples de configurations avec 4 câbles

Pour l'ensemble des expériences menées dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé la configuration 4 – 1 (Fig.1.13c) qui nous permet de contrôler les déplacements en translation, le quatrième câble ayant été ajouté pour augmenter la taille l'espace de travail de manière à pouvoir se déplacer dans la quasi-totalité de l'appartement-témoin. Pour un triplet de câbles en tension, il est facile de montrer que l'équilibre statique est satisfait si le point \mathbf{B} à sa projection dans le plan des $\mathbf{A}_i, \mathbf{A}_j, \mathbf{A}_k$ à l'intérieur du triangle constitué par ces trois points. La figure (Fig.1.12) montre alors l'espace de travail atteignable pour chaque triplet de câbles en tension : on note qu'en tout point dont la projection verticale 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. Si la projection se trouve sur une diagonale, il existe une configuration qui a deux câbles en tension, à l'exception de l'intersection des diagonales pour laquelle nous avons deux configurations avec seulement deux câbles avec des $\tau > 0$.

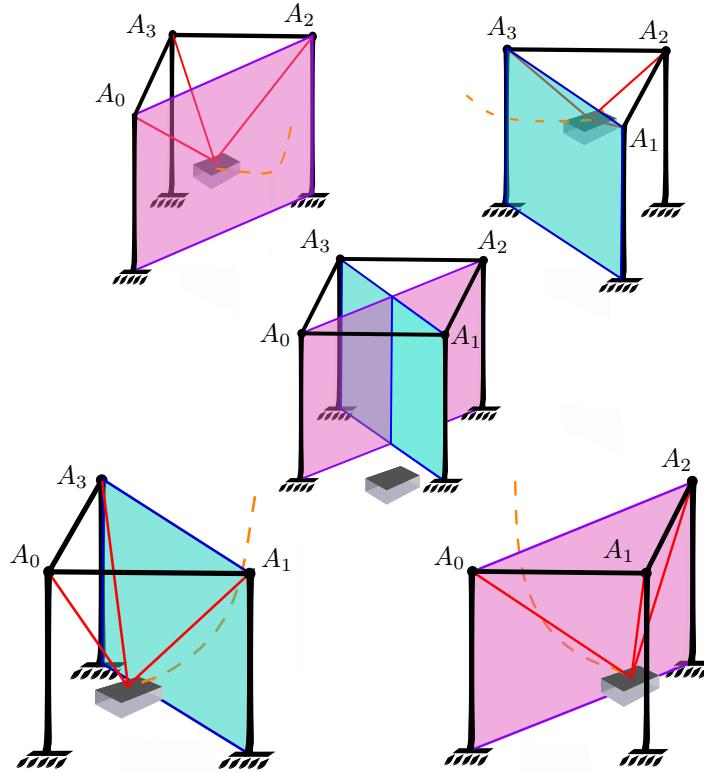


Figure 1.12: La figure au centre représente le robot **Marionet-Assist**; en bas à gauche est représenté l'espace de travail atteignable lorsque les câbles attachés aux points A_0 , A_1 , A_3 sont en tension, en bas à droite l'espace de travail atteignable pour les câbles reliés aux points A_0 , A_1 , 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 .

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 tambours actionnées par des moteurs rotatifs (Fig.1.13d). Toutefois, en l'absence de guide pour l'enroulement, il existe des incertitudes sur la longueur déroulée ; afin de pallier à cet inconvénient, des repères en aluminium ont été disposés sur les câbles à des longueurs connues, ce qui permet lors de leur détection au point A_i de réactualiser la valeur estimée de la longueur déroulée.

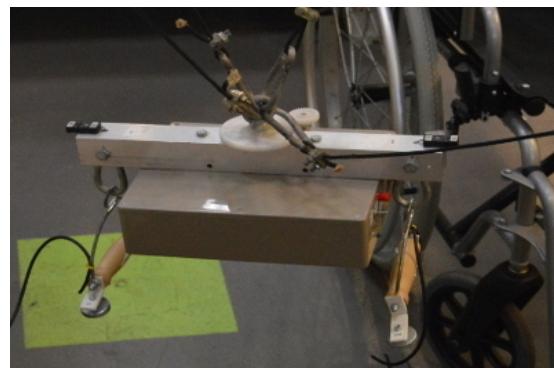
Ces propriétés font de **Marionet-Assist** un robot adapté au contexte pour lequel il a été conçu. Nous avons cependant souhaité améliorer ses fonctionnalités de manipulation en lui permettant de ne pas seulement déplacer une personne, mais également des objets de la vie quotidienne. Il peut s'agir par 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 déplacement et dans la manipulation de l'objet cible, une caméra a été ajoutée sur la plate-forme, de manière à utiliser des techniques d'asservissement visuel.



(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 1.13: Marionet-Assist

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 Conclusion

Après avoir mis en avant les inconvénients des architectures séries pour certaines tâches, nous avons présenté dans un premier temps les architectures parallèles. Ces dernières permettent en particulier de supporter de plus lourdes charges avec une précision accrue, pour une taille du dispositif moindre. Les robots parallèles présentent cependant l'inconvénient d'évoluer dans un espace de travail restreint. Pour cette raison, l'utilisation de câbles a été proposée à la place de jambes rigides. Nous avons donc présenté les principales caractéristiques des robots parallèles à câbles, et identifié les problématiques qu'entraînait le choix d'une telle architecture, au rang desquelles la complexité accrue des modèles géométriques et cinématiques, ainsi que la difficulté à gérer la nature des tensions (nulles ou strictement positives) pour chaque câble. Enfin, nous avons introduit les spécificités d'une classe particulière de manipulateurs à câbles : les robots N-1, dont fait parti le prototype que nous avons utilisé dans le cadre de ce travail, le robot *Marionet-Assist*. Dans le chapitre suivant, nous introduirons les principales notions d'asservissement visuel, avant de nous pencher sur les spécificités d'une utilisation dans le contexte de robots parallèles à câbles. Nous pourrons dès lors clairement identifier les pistes d'amélioration de manipulation que l'association de ces deux technologies permet.

Chapitre 2

Asservissement visuel

La vision représente pour les humains environ 70% des données issues des perceptions sensorielles externes [39] : 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 grande variété d'informations ce qui est pertinent pour une tâche prescrite) et d'une stratégie d'asservissement d'autre part (afin de stabiliser une tâche malgré les erreurs et incertitudes sur les données).

Nous allons donc dans un premier temps présenter 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 dans une seconde section distinguer plusieurs configurations et exposer différentes stratégies d'asservissement pouvant être utilisées. Une troisième section sera consacrée à la construction des lois de commandes, dont nous fournirons quelques exemples. La quatrième section de ce chapitre présentera les spécificités d'une utilisation de l'asservissement visuel dans le contexte des manipulateurs parallèles à câbles : après avoir présenté les principaux travaux ayant été effectués dans ce domaine, nous pourrons indiquer les angles d'études que nous avons privilégiés, les problématiques qui en émergent, et les pistes de résolution que nous avons empruntées.

2.1 Modèles de capteurs et projections

2.1.1 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 image. 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 :

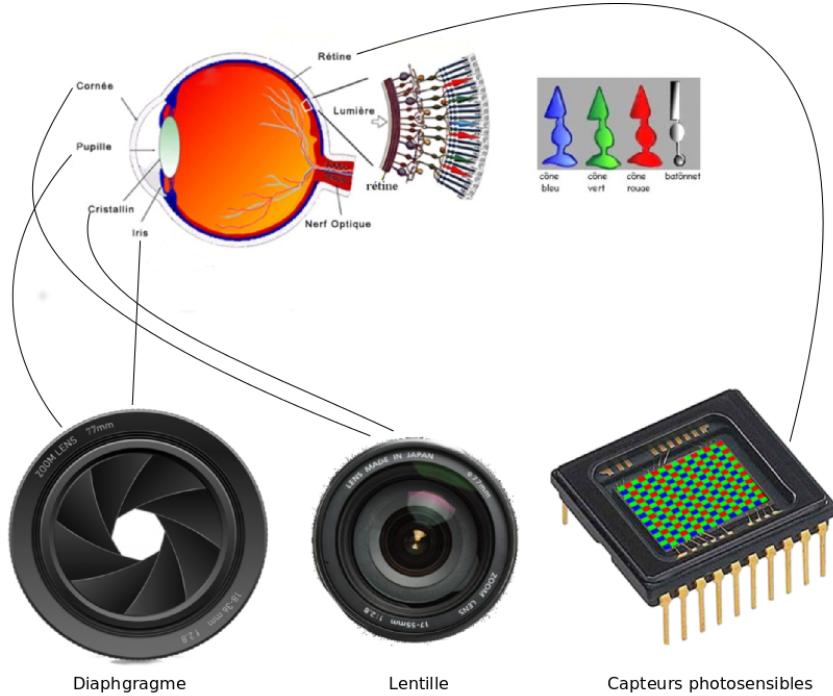


Figure 2.1: Oeil humain vs vision artificielle

- 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 en traitement d'image)
- les bâtonnets, impliqués dans la vision nocturne. Ne possédant qu'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 dès lors fondamental d'exploiter les données recueillies de manière à tendre vers une représentation exploitable de la scène initiale projetée sur les capteurs.

Une première option serait de tenter de reconstruire la scène le plus fidèlement possible. On pourra dans ce cas privilégier l'utilisation de caméras stéréos (Fig.2.2a) [6], ou encore de capteurs RGB-D (Fig.2.2b) [41]. A l'aide de caméras

stéréos, nous pouvons percevoir la scène selon plusieurs perspectives, tout comme avec la vision binoculaire. En croisant les données obtenues à partir des différents points de vue, il est possible d'approcher une représentation tri-dimensionnelle de la scène acquise au sein de l'image. Quant aux capteurs RGB-D, ils complètent les données acquises grâce à une ou plusieurs caméras avec de dispositifs permettant de recueillir une information sur la profondeur. La fusion des données géométriques et colorimétriques obtenues par les caméras classiques et de la localisation tridimensionnelle de points permet une reconstruction 3D de la scène observable. En multipliant les points de vue (soit par le mouvement, soit en utilisant plusieurs dispositifs), ou en exploitant un modèle connu de la scène observé, on sera en mesure d'obtenir une représentation fidèle d'un environnement. Ce sont toutefois des dispositifs onéreux, qui peuvent sembler inutilement intrusifs selon le contexte d'utilisation, et requérant bien souvent une puissance de calcul démesurée par rapport aux informations dont on a besoin.



(a) Jean-Luc Godard expérimentant avec la caméra stéréographie pour tourner *Adieu au langage 3D*
 (b) La Kinect de @Microsoft qui a permis la démocratisation de l'utilisation des capteurs RGB-D

Figure 2.2: Exemples de caméras stéréo et de capteurs RGB-D.

Une seconde option consiste à déterminer les transformations géométriques d'objets dans le plan image générées par une modification soit d'une partie de la scène (objet en mouvement), soit de la pose de la caméra elle-même, voire des deux simultanément. Ceci permet entre autres de s'abstraire en partie au moins de la représentation tridimensionnelle de la scène projetée sur l'image, en utilisant par exemple la géométrie plückerienne [4], des descripteurs locaux ou globaux [5], ou encore des représentations fréquentielles (Fourier [10], ondelettes [40]). Le lecteur pourra retrouver les principales techniques dans [29].

Le choix d'un type de capteur n'est donc pas anodin, il dépend de paramètres aussi divers que la quantité et la densité des informations, les connaissances préalables que l'on peut avoir d'une scène ou d'un objet, du type d'informations disponibles dans l'images et pertinentes par rapport au contexte (scènes homogènes ou texturées, mobiles ou statiques, diurnes ou nocturnes, ···).

Nous partirons du principe que nous utilisons une seule caméra simple, ce choix étant justifié dans la dernière section de ce chapitre. L'objectif est à présent de définir le modèle de représentation que nous avons utilisé, soit la manière dont la scène est projetée dans l'image.

2.1.2 De la scène à l'image

Modèle de projection

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 [20] [23], 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 $\mathbf{p} = (x_m, y_m)$ ses coordonnées métriques 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.2.3).

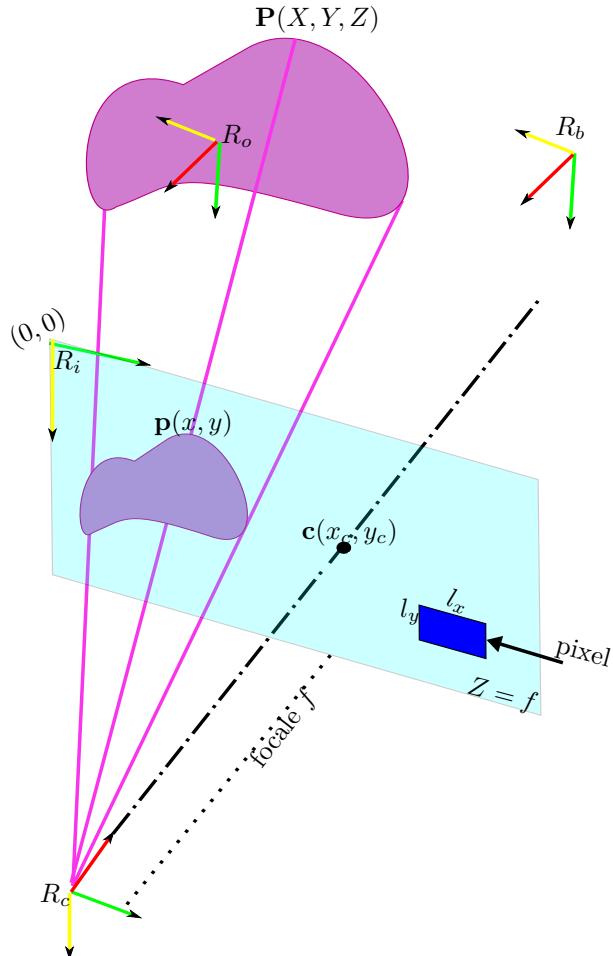


Figure 2.3: Modèle de projection *pinhole*

En plus du *référentiel-base* \mathcal{R}_b et du référentiel de l'organe terminal \mathcal{R}_e (cf.

Section ??) 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 :

$$x_m = f \frac{X}{Z}, y_m = f \frac{Y}{Z} \quad (2.1)$$

ou, sous forme matricielle :

$$Z \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

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_m, y_m) et les coordonnées pixelliques (x_p, y_p) , se fait selon la relation suivante :

$$\begin{cases} x_p = x_c + x_m/l_x \\ y_p = y_c + y_m/l_y \end{cases} \quad (2.3)$$

ce qui donne sous une forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{l_x} & 0 & x_c \\ 0 & \frac{1}{l_y} & y_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

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 :

$$Z \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & x_c \\ 0 & \alpha_y & y_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

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 $\mathbf{K} = \mathbf{AB}$ ainsi construite sont généralement obtenus par calibration [7], [44], [42]. La matrice \mathbf{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 :

$$\begin{cases} x = X/Z \\ y = Y/Z \end{cases} \quad (2.6)$$

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

Enfin, les coordonnées 3D du point étant exprimées dans le repère caméra, nous voulons pouvoir les traduire dans le référentiel propre de l'objet.

Changements de repère

Soient à présent ${}^c\mathbf{P} = ({}^cX, {}^cY, {}^cZ)$ 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 autour 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 :

$${}^c\tilde{\mathbf{P}} = {}^c\mathbf{M}_o {}^o\tilde{\mathbf{P}} \quad (2.7)$$

soit :

$$\begin{bmatrix} {}^cX \\ {}^cY \\ {}^cZ \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^c\mathbf{R}_o & {}^c\mathbf{t}_o \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^oX \\ {}^oY \\ {}^oZ \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

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 :

$${}^o\mathbf{M}_c = \begin{bmatrix} {}^c\mathbf{R}_o^T & -{}^c\mathbf{R}_o^T {}^c\mathbf{t}_o \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

En pratique, il suffit de 6 paramètres pour décrire entièrement la matrice homogène : 3 pour la translation et 3 pour la rotation. Si l'on utilise par exemple une représentation des rotations sous la forme $\mathbf{r} = (\theta\mathbf{u})$, avec \mathbf{u} un vecteur unitaire et θ l'angle de rotation autour de ce vecteur, une matrice homogène \mathbf{M} peut être représentée par le vecteur suivant :

$$\mathbf{m} = (\mathbf{t}, \theta\mathbf{u}) \quad (2.10)$$

Nous sommes à présent en mesure d'établir une relation entre la scène observée dans son référentiel propre, dans le référentiel de la caméra (et par extension dans chacun des référentiels du manipulateur) et sa projection dans l'image, exprimée en coordonnées pixelliques, métriques et normalisées. 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 profondeur (coordonnée cZ), ce dont nous aurons à tenir compte lorsqu'il s'agira de déterminer le type de mesures que nous utiliserons pour déduire les consignes à donner au manipulateur.

2.2 Modalités d'asservissement visuel

Selon la nature du manipulateur et le contexte dans lequel celui-ci est utilisé, plusieurs stratégies d'asservissement visuel peuvent être utilisées. Nous distinguons en particulier les modalités architecturales (positionnement de la caméra par rapport au robot et à la scène) et les modalités méthodologiques (espace de régulation).

2.2.1 Positionnement de la caméra

Lorsque la caméra est placée en dehors de la partie mobile du manipulateur, on parlera de configuration déportée (Fig.2.4a). Une caméra déportée peut être fixe ou mobile, et permet généralement d'appréhender une scène d'une manière globale : elle comporte dans son plan image une représentation de l'organe terminal du robot, et le cas échéant d'un objet d'intérêt, qu'il peut tout autant être l'organe terminal, que l'une des articulations ou encore un objet cible que l'on souhaite manipuler. L'utilisation d'une caméra déportée se justifie en particulier lorsque l'on souhaite estimer la pose de l'organe terminal par rapport à un référentiel fixe. Toutefois, l'utilisation d'une caméra déportée – particulièrement si elle est fixe – suppose une scène relativement dégagée et un espace de travail compatible avec son champs de vision et sa résolution. Il est toujours possible cependant de multiplier les dispositifs.

Dans le cas contraire où la caméra se trouverait liée à l'organe terminal d'un manipulateur, on parle en toute logique d'une configuration embarquée (Fig.2.4b). Une caméra embarquée présente l'avantage de pouvoir couvrir l'ensemble de l'espace de travail accessible au manipulateur et de compenser les limites de sa résolution par sa mobilité. La transformation permettant de passer du référentiel de l'organe terminal au référentiel de la caméra est dans ce cas connue avec une précision suffisante, et sera généralement fixe.

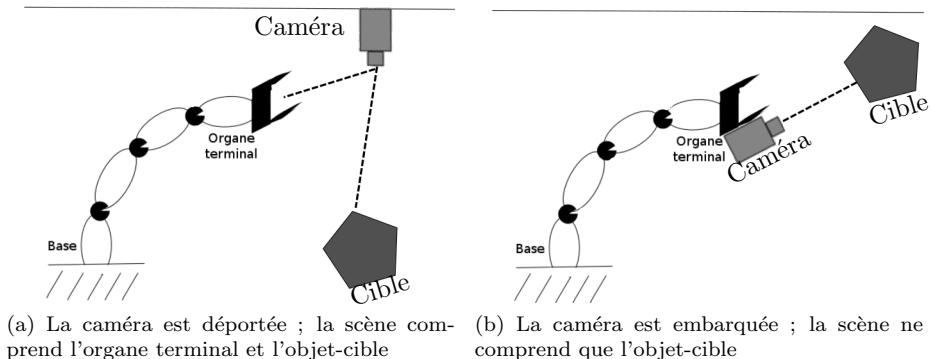


Figure 2.4: Positionnements de caméra

L'utilisation d'une caméra embarquée est particulièrement adaptée aux tâches de suivi et de manipulation d'objets. On la préfère par exemple dans le cadre de la robotique mobile, ou encore lorsque l'espace de travail d'un système robotique ne permet pas l'utilisation de caméras déportées, soit en raison de sa nature (robotique mobile aérienne, robotique sous-marine par exemple), soit de sa taille (robots parallèles à câbles de grande envergure).

2.2.2 Asservissements en position, basés images et hybrides

L'asservissement visuel consiste à exploiter les informations visuelles situées dans une image, puis d'en déduire des mesures s dont on souhaite qu'elles convergent vers un ensemble de valeurs s^* correspondant à un résultat prédéterminé. L'écart entre les valeurs mesurées et l'objectif constitue l'erreur e de consigne.

Cette erreur de consigne est alors utilisée pour construire une commande de déplacement pour le robot (Fig.2.5). On parle de *boucle ouverte* lorsque une seule itération est effectuée et suffit à produire une consigne convergeant vers le résultat escompté. On utilise cependant généralement un schéma en boucle fermée consistant à mesurer dans chaque nouvelle image acquise une correction de la commande. Un schéma en boucle fermé permet de prendre en compte les différentes incertitudes liées à la réalité d'un déplacement du robot par rapport à son mouvement théorique, et permet entre autres une robustesse aux erreurs de mesures dans l'image, qui peuvent provenir par exemple de la résolution limitée du capteur, ou encore de la présence d'artefacts (ombres, occlusions, ···).

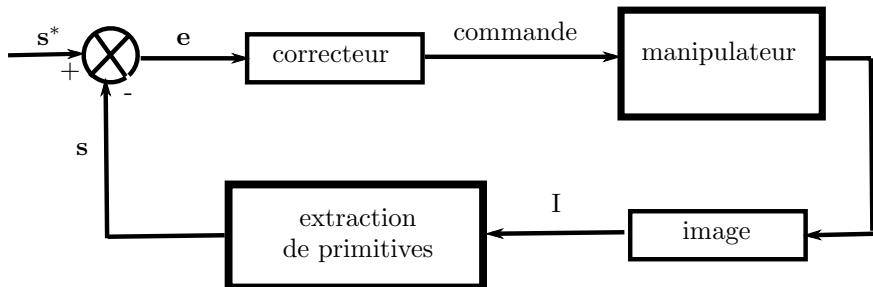


Figure 2.5: Schéma des étapes de l'asservissement visuel

Les informations visuelles à partir desquelles sera construite la consigne (déplacement exprimé dans l'espace opérationnel)– dont on déduira une *loi de commande* (déplacement exprimé dans l'espace articulaire)– sont appelées *primitives*. Selon la nature des primitives, on distingue plusieurs types d'asservissement visuels.

Asservissement 3D :

A partir d'un modèle 3D d'un objet (qui peut-être l'organe terminal) et d'une stratégie de reconstruction, on cherche à estimer la pose courante de l'objet par rapport à la caméra et de la faire converger vers une pose désirée, ce que l'on pourra obtenir soit par un mouvement de la caméra, soit par un déplacement de l'objet. Dans ce cas, s correspondra aux paramètres de pose de la caméra. On définit \mathcal{R}_c et \mathcal{R}_{c^*} comme étant respectivement les référentiels courant et désiré de la caméra, et \mathcal{R}_o le référentiel objet. Les deux stratégies suivantes peuvent par exemple être utilisées :

- si ${}^c\mathbf{t}_o$ et ${}^{c^*}\mathbf{t}_o$ sont les coordonnées de l'objet exprimées respectivement dans le référentiel courant de la caméra et dans le référentiel désiré, et ${}^o\mathbf{R}_c$ la matrice de rotation donnant le référentiel courant par rapport au référentiel désiré, alors on a :

$$\begin{cases} \mathbf{s} = & ({}^c\mathbf{t}_o, \theta\mathbf{u}) \\ \mathbf{s}^* = & ({}^{c^*}\mathbf{t}_o, \mathbf{0}) \\ \mathbf{e} = & ({}^c\mathbf{t}_o - {}^{c^*}\mathbf{t}_o, \theta\mathbf{u}) \end{cases} \quad (2.11)$$

$\theta\mathbf{u}$ paramétrisant la matrice de rotation ${}^o\mathbf{R}_c$. La consigne générée à partir de cette représentation de l'erreur (dont on peut trouver le détail

dans [12]) correspondent à une trajectoire en ligne droite dans l'image, mais pas pour la caméra.

- au contraire, si on utilise :

$$\begin{cases} \mathbf{s} &= ({^c}\mathbf{t}_c, \theta\mathbf{u}) \\ \mathbf{s}^* &= (0, \mathbf{0}) \\ \mathbf{e} &= ({^c}\mathbf{t}_c, \theta\mathbf{u}) \end{cases} \quad (2.12)$$

${^c}\mathbf{t}_c$ correspondant ici aux coordonnées du repère caméra courant par rapport au repère caméra désiré, alors nous obtenons en théorie une trajectoire en ligne droite pour le déplacement de la caméra, mais ça ne sera plus le cas pour la trajectoire réalisée dans l'image.

Ainsi, dans le premier cas, on prend le risque de générer une trajectoire pour la caméra qui sorte des limites de l'espace de travail, et dans le deuxième cas de voir sortir l'objet d'intérêt de l'image. L'utilisation de l'une ou de l'autre méthode impose donc des vérifications supplémentaires afin de garantir la réalisation de la tâche. Aucune des deux solutions ne présentant un clair avantage sur l'autre, le choix dépendra du contexte et des stratégies algorithmiques mises en place.

Asservissement 2D :

Au contraire de l'asservissement 3D, l'asservissement 2D que l'on retrouve également sous l'acronyme *IBVS* (pour *Image-based visual servoing*, l'asservissement 3D relevant du *Position-based visual servoing*) exploite directement les primitives extraites des informations visuelles sans passer ni par un modèle de la scène ou de l'objet, ni par une reconstruction quelconque. Lorsque la caméra se déplace, cela implique variations des propriétés mesurables dans l'image. Si l'on est en capacité détablir une relation entre les variations des propriétés dans l'image et les mouvements du capteur, alors il est possible d'obtenir un contrôleur qui ne repose que sur la régulation des valeurs des primitives. A titre d'exemple, sur lequel nous reviendrons dans le prochain chapitre, la mesure de l'aire d'une surface et la détermination de son centre de gravité suffisent à contrôler la position d'un manipulateur.

Si un asservissement 2D présente le clair avantage de proposer une consigne déterminée uniquement à partir de l'espace du capteur, la construction même de la consigne dépend souvent d'estimations supplémentaires telles que la profondeur en chaque point. La qualité de l'estimation affectera dès lors celle de la consigne. Une solution sera par exemple de recourir à des capteurs supplémentaires pour obtenir ces estimations.

De manière générale, le choix d'une primitive visuelle pourra être déterminé à partir de quatre critères :

- sa disponibilité dans l'image, sa facilité d'extraction et sa robustesse aux variations de l'environnement (luminosité, occlusion, ...)
- son découplage par rapport aux degrés de liberté contrôlés : on souhaite en effet qu'une primitive puisse avoir une réponse forte à la variation d'un des degrés de liberté, mais faible aux variations des autres.

- son indépendance aux estimations supplémentaires telles que la profondeur ou l'orientation du plan de l'image
- la convergence du schéma de contrôle qui en sera déduit.

Le choix d'un ensemble de primitives visuelles prendra donc en compte la manière dont celles-ci se complètent, dans un équilibre entre découplage (pour la robustesse aux erreurs de commande) et redondance (pour la compensation des erreurs entre primitives) qui dépendra du contexte des prises de vue (environnement contrôlé, dynamique, bruité, ···).

Asservissement 2D 1/2 :

Proposé par [27], l'asservissement 2D 1/2 (également appelé hybride) combine une approche 2D pour les paramètres de translation et 3D pour les rotations. Pour cela, on utilisera par exemple des points d'intérêts dans l'image, à partir desquels on pourra estimer une homographie entre l'image courante et une image de référence. De cette homographie seront déduites des mesures permettant de construire \mathbf{s} à partir d'informations 2D et 3D, puis de déterminer une consigne – que l'on qualifiera d'hybride – pour la caméra, et enfin une commande pour le robot. L'utilisation de l'asservissement 2D 1/2 présente en particulier l'avantage d'offrir un découplage des contrôles en rotation et en translation, mais également de se dispenser d'une estimation de la profondeur, qui sera plutôt déduite des homographies successives.

2.2.3 Justification des choix de configuration dans le cadre de notre étude

Nous avons donc le choix des types de capteurs à utiliser (caméras monoculaires, caméras stéréos, capteurs RGB-D, ···), de leur disposition, de leur nombre ainsi que de la méthodologie d'exploitation des données de l'image et des connaissances *a priori* d'une scène.

Type de capteurs :

La possibilité d'une reconstruction fidèle de la scène n'en implique aucunement la nécessité. En particulier, le robot **Marionet-Assist** sur lequel nous avons conduits nos expérimentations a été conçu dans un cadre de robotique de service et d'assistance, déployable donc dans des environnements privés (domicile de l'utilisateur ou chambre d'hôpital par exemple). A ce titre, se pose la question de l'intimité et du respect de la vie privée des utilisateurs. Si nous pouvons réaliser avec une caméra monoculaire les mesures nécessaires à la réalisation d'une tâche sans efforts supplémentaires démesurés, ce choix doit être privilégié. La question n'est pas tant ici de faire mieux avec plus, mais de faire autant avec moins, en utilisant les propriétés des robots à câbles pour obtenir des lois de commande simplifiées et néanmoins précises et robustes.

Disposition et nombre des capteurs :

Les robots parallèles à câbles se distinguent par la taille de leur espace de travail généralement conséquente. A titre d'exemple, le robot **Marionet-Assist** 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 $100m \times 35m \times 35m$. Dès lors, l'utilisation d'une seule caméra déportée sera probablement insuffisante pour couvrir l'ensemble de l'espace atteignable par le manipulateur. Les solutions envisageables sont donc l'utilisation de plusieurs dispositifs déportés, d'un dispositif embarqué, ou d'un dispositif embarqué complété par un ou plusieurs dispositifs déportés. Puisque les robots **Marionet** ont également vocation à être utilisés dans des environnements dynamiques et/ou inconnus (pièces de vie, catastrophe naturelle, ...), il nous semble opportun d'assurer la présence d'au moins un capteur embarqué, afin de pouvoir contourner d'éventuels obstacles, ou de pouvoir s'approcher suffisamment près d'une scène pour compenser d'éventuelles limites de résolution. La question se pose alors de savoir si une seule caméra embarquée suffit, ou s'il est nécessaire de compléter le dispositif avec d'autres capteurs déportés.

Pour assurer la saisie et la manipulation d'un objet, nous montrerons au chapitre suivant qu'une caméra embarquée suffit à la convergence de la tâche d'asservissement. Toutefois, nous avons vu que la jacobienne du robot, qui peut être utilisée soit pour un contrôle cinématique, soit pour vérifier l'équilibre statique, était dépendante de la pose et des coordonnées articulaires. Une caméra déportée peut donc s'avérer judicieuse pour servir de capteur extéroceptif. Nous verrons dans la dernière section de ce chapitre que cette piste a été étudiée et fournit des résultats tout-à-fait intéressants.

Toutefois, nous montrerons que notre schéma d'asservissement est robuste aux erreurs de modélisations, et donc qu'une estimation précise de la pose ou des longueurs de câbles n'est pas nécessaire. Dans une version simplifiée de la commande utilisée pour l'asservissement, nous verrons d'ailleurs que nous pouvons nous passer en partie des paramètres de pose et des coordonnées articulaires.

Nous prenons donc le parti dans ce travail de ne travailler qu'avec une seule caméra embarquée.

Stratégie d'asservissement :

Une caméra embarquée suffit pour pouvoir utiliser une stratégie PBVS en multipliant les points de vue, et est totalement adaptée aux asservissements 2D et hybrides. Pour autant, lorsque nous évoquerons les travaux existants sur l'asservissement des robots parallèles à câbles, nous verrons que l'asservissement 3D a déjà été exploré et a donné des résultats tout-à-fait convaincants. Dès lors, nous nous concentrerons ici sur les asservissements 2D afin de compléter l'état de l'art, l'extension aux asservissements hybrides ne présentant pas de difficulté supplémentaire. En particulier, un choix particulier de primitives – les moments 2D – nous permettra de ne pas nous appuyer sur des mesures supplémentaires, telles l'estimation de la profondeur.

2.3 Détermination du schéma de consigne

Nous reprenons ici les bases de construction d'une loi de commande [19]. Le lecteur les retrouvera développées par exemple dans [11]. Nous nous contenterons

ici d'exposer les principes généraux d'outils que nous avons utilisés tout au long de nos travaux.

2.3.1 Construction de la loi de commande

Soient $\mathbf{s}(m(t), a)$ un vecteur comprenant de mesures $m(t)$ réalisées au sein de l'image sur des primitives choisies et a la paramétrisation de connaissances *a priori*, telles les paramètres intrinsèques de la caméra ou encore des connaissances préalable sur la scène ou l'objet ciblé. Le vecteur \mathbf{s}^* dénote les valeurs désirées des mesures.

On construit alors le vecteur :

$$\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}^* \quad (2.13)$$

représentant une erreur correspondant à la différence entre les valeurs courantes et les valeurs désirées.

Nous souhaitons que l'erreur \mathbf{e} de mesure décroisse de manière exponentielle, soit :

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e} \quad (2.14)$$

λ étant un *gain*, permettant de régler la vitesse de convergence.

On choisit ici d'utiliser un contrôle en vitesse. Soit le torseur cinématique $\mathbf{v}_c = (\boldsymbol{\nu}_c, \boldsymbol{\omega}_c)$, avec $\boldsymbol{\nu}_c$ et $\boldsymbol{\omega}_c$ les vitesses instantanées respectivement linéaires et angulaires exprimées dans le référentiel-caméra. 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 peut prendre la forme algébrique d'une matrice $\mathbf{L}_s \in \mathcal{M}_{k \times 6}$ que l'on appelle *matrice d'interaction* [18], k étant le nombres de mesures effectuées. Nous avons alors la relation :

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s \mathbf{v}_c \quad (2.15)$$

En combinant (Eq.2.13) et (Eq.2.15), la relation entre la variation de l'erreur et la vitesse de la caméra se déduit immédiatement :

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L}_e \mathbf{v}_c \quad (2.16)$$

avec $\mathbf{L}_e = \mathbf{L}_s$.

Dès lors, (Eq.2.14) et (Eq.2.16) nous donnent :

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \mathbf{L}_e^+ \mathbf{e} \quad (2.17)$$

avec \mathbf{L}_e^+ pouvant être de plusieurs natures :

- lorsque $k \geq 6$ et que la matrice \mathbf{L}_e est de rang plein, \mathbf{L}_e^+ correspondra à la matrice pseudo-inverse de Moore-Penrose de \mathbf{L}_e , soit $\mathbf{L}_e^+ = (\mathbf{L}_e^T \mathbf{L}_e)^{-1} \mathbf{L}_e^T$.
- lorsque $k = 6$ et que le déterminant de la matrice d'interaction est non-nul, on pourra écrire $\dot{\mathbf{v}}_c = -\lambda \mathbf{L}_e^{-1} \mathbf{e}$.

Devant la difficulté en pratique de connaître avec exactitude \mathbf{L}_e , on utilisera plutôt une approximation de la matrice d'interaction, la loi de commande finale devenant :

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}_e^+ \mathbf{e} \quad (2.18)$$

Cette estimation dépend à la fois de la qualité des mesures effectuées dans l'image, des hypothèses de modélisation, de l'estimation de paramètres supplémentaires, ou encore de la calibration de la caméra.

Le choix d'une méthode d'estimation particulière dépend évidemment des conditions dans lesquelles se déroulent l'asservissement, et affectera nécessairement la qualité de celui-ci. Il est usuel d'utiliser $\mathbf{L}_e^+ = \mathbf{L}_{e_*}^+$ [18], soit de prendre pour matrice d'interaction celle qui correspond aux valeurs théoriques qui seraient prises une fois l'objectif atteint. La matrice est alors constante, mais – en particulier pour de grands déplacements –, il s'agit d'une estimation grossière, notamment lorsqu'une estimation de la profondeur est requise. Afin de trouver un équilibre entre qualité des approximations et robustesse aux imprécisions, le choix de $\mathbf{L}_e^+ = (\mathbf{L}_e^+ + \mathbf{L}_{e_*}^+)$ [26] peut se révéler être un bon compromis, et offre de meilleures propriétés de convergence.

La stabilité d'un schéma de consigne peut être évaluée grâce au critère de stabilité asymptotique de Lyapunov. On définit pour cela une fonction $\mathcal{L} = \frac{1}{2}\|e(t)\|^2$, dont la dérivée est donnée par :

$$\dot{\mathcal{L}} = \mathbf{e}^T \dot{\mathbf{e}} \quad (2.19)$$

soit :

$$\dot{\mathcal{L}} = -\lambda \mathbf{e}^T \mathbf{L}_e \widehat{\mathbf{L}}_e^+ \mathbf{e} \quad (2.20)$$

Une condition suffisante de stabilité asymptotique au sens de Lyapunov est donnée par :

$$\mathbf{L}_e \widehat{\mathbf{L}}_e^+ > 0 \quad (2.21)$$

Lorsque la matrice \mathbf{L}_e est carrée (le nombre de mesures indépendantes étant égal au nombre de degrés de liberté contrôlés, idéalement 6) et de rang plein, la stabilité est assurée en théorie, puisque l'on aura :

$$\mathbf{L}_e \mathbf{L}_e^{-1} = \mathbb{I}_k > 0 \quad (2.22)$$

En pratique, si la matrice $\widehat{\mathbf{L}}_e^+$ est suffisamment proche de \mathbf{L}_e^+ , la stabilité est assurée.

2.3.2 Exemple de matrice d'interaction : le point

Pour rappel, un point dans l'espace $\mathbf{P} = (X, Y, Z)$ se projette dans l'image de la manière suivante :

$$\begin{cases} x = X/Z \\ y = Y/Z \end{cases} \quad (2.23)$$

où (x, y) sont les coordonnées généralisées du point dans l'image.

En dérivant cette relation, nous obtenons :

$$\begin{cases} \dot{x} = \dot{X}/Z - X\dot{Z}/Z^2 = (\dot{X} - x\dot{Z})/Z \\ \dot{y} = \dot{Y}/Z - Y\dot{Z}/Z^2 = (\dot{Y} - y\dot{Z})/Z \end{cases} \quad (2.24)$$

Soit $\mathbf{v} = (\boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\omega})$ le torseur cinématique de la caméra, la relation permettant d'exprimer la vitesse du point \mathbf{X} par rapport à la vitesse de la caméra s'écrit :

$$\dot{\mathbf{X}} = -\mathbf{v} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{X} \quad (2.25)$$

soit :

$$\begin{cases} \dot{X} = -\nu_x - \omega_y Z + \omega_z Y \\ \dot{Y} = -\nu_y - \omega_z X + \omega_x Z \\ \dot{Z} = -\nu_z - \omega_x Y + \omega_y X \end{cases} \quad (2.26)$$

Dès lors, en combinant (Eq.2.18) et (Eq.2.24), on obtient :

$$\begin{cases} \dot{x} = -\nu_x/Z + x\nu_z/Z + xy\omega_x - (1+x^2)\omega_y + y\omega_z \\ \dot{y} = -\nu_y/Z + y\nu_z/Z + (1+y^2)\omega_x - xy\omega_y - x\omega_z \end{cases} \quad (2.27)$$

La matrice d'interaction \mathbf{L}_x reliant la vitesse du point $\mathbf{x} = (x, y)$ au torseur cinématique de la caméra est alors :

$$\mathbf{L}_x = \begin{bmatrix} \frac{-1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & \frac{-1}{Z} & \frac{y}{Z} & 1+y^2 & -xy & -x \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

soit bien $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{L}_x \mathbf{v}$.

Afin de contrôler 6 degrés de liberté, 3 points au minimum sont nécessaires, mais la matrice pourra alors en certaines poses se révéler singulière [35]. Il existe de plus plusieurs minima locaux conduisant à $\mathbf{e} = 0$. Pour ces deux raisons, on utilisera 4 points au moins pour contrôler le manipulateur.

De plus, la matrice étant exprimée dans les coordonnées généralisées, elle dépend des paramètres de la caméra. Elle nécessite enfin une approximation de Z , et ceci pour chaque point permettant de construire la matrice d'interaction. En conséquence, la matrice théorique que nous venons d'expliciter ne peut être utilisée en l'état, nous recourrons donc à une approximation, comme vu dans la sous-section précédente (2.3.1).

2.4 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.

2.4. ASSERVISSEMENT VISUEL DES ROBOTS PARALLÈLES À CÂBLES 37

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 [28], [24] ou d'une caméra déportée [14], [37] : 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. [32], [38], 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 [3] : 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 [17] 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 [15], 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 plate-forme. Le schéma d'ensemble utilise donc un premier ensemble de quatre caméras filmant un motif sur l'organe terminal pour proposer un asservissement 3D 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 pour des raisons mentionnée précédemment, à savoir le type d'applications correspondant aux robots Marionet (particulièrement les robots Marionet-Assist et Marionet-Crane), mais également afin de fournir un complément à ce que ces auteurs ont développé.
- 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 :

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \widehat{\mathbf{J}}^{-1} \widehat{\mathbf{L}}_e^+ \mathbf{e} \quad (2.29)$$

Certes, l'estimation des valeurs de la Jacobienne inverse est considérablement simplifiée par l'utilisation de la vision, mais 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 :

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \widehat{\mathbf{K}} \mathbf{e} \quad (2.30)$$

ne nécessitant pas plus de connaissance précise de la pose \mathbf{X} que des valeurs des variables articulaires ρ . Ceci permet en particulier de définir un asservissement exploitant les mesures réalisées dans l'image pour obtenir un contrôle simplifié exprimé directement dans l'espace articulaire.

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 suivant.

2.5 Conclusions

L'objectif de ce chapitre était de présenter les principaux éléments d'asservissement visuel que nous avons utilisé dans le cadre de ce travail. Nous avons pour cela commencé par expliciter le modèle de projection utilisé afin de définir les différents systèmes de coordonnées utilisées et leurs relations. Nous avons ensuite exposé plusieurs stratégies possibles d'asservissement visuel pouvant être exploitées dans notre contexte, et présenté les raisons qui nous ont mené à faire le choix d'un dispositif n'utilisant qu'une caméra embarquée avec une stratégie basée image. Dans la troisième section de ce chapitre, nous avons détaillé la construction d'un schéma de consigne prenant la forme $\mathbf{v} = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}_e^* \mathbf{e}$, aboutissant à une loi de commande pour un robot : $\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \widehat{\mathbf{J}}^{-1} \widehat{\mathbf{L}}_e^* \mathbf{e}$. Après en avoir discuté les conditions de convergence et de stabilité, nous avons donné un exemple de construction d'une matrice d'interaction, cœur du schéma de consigne.

Nous avons enfin présenté les travaux nous semblant les plus pertinents dans le domaine de l'asservissement visuel des robots parallèles à câble [16]. Toutefois, nous souhaitons nous en distinguer pour des raisons qui tiennent tout à la fois à la lourdeur du dispositif impliqué, mais également aux stratégies utilisées (principalement l'approche PBVS pour estimer la pose), qui ne nous semblent pas compatible avec les applications de nos robots.

Le travail que nous avons effectué, présenté dans les chapitres suivants, 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** de la loi de commande

Dans ce but, la suite de nos travaux se découpent de la manière suivante :

- dans le chapitre suivant, nous présenterons dans un premier temps les principes d'un asservissement visuel de robots à câbles dans les conditions pratiques que nous avons détaillées précédemment, ainsi que le choix de primitives particulier que nous avons opéré.
- nous montrerons ensuite quelles améliorations sont ainsi permises concernant la précision et la robustesse d'une commande de déplacement et de manipulation.
- enfin, nous concluerons ce chapitre en proposant une loi de commande simplifiée permettant d'obtenir directement des images une commande articulaire. Nous utiliserons pour cela une première estimation de la matrice **K** reliant les coordonnées articulaires aux mesures effectuées dans l'image, que nous actualiseront grâce à la méthode de Broyden permettant de converger rapidement vers une trajectoire linéaire.
- l'efficacité de cette dernière étape n'est cependant garantie qu'à la condition que nous sachions quels sont les câbles qui contrôlent effectivement les déplacements de la plate-forme. Nous proposerons alors dans un quatrième chapitre une méthode permettant de sélectionner la configuration que nous désirons en fonctions de critères que nous discuterons.
- simulations, expérimentations et résultats seront proposés dans le dernier chapitre de cette étude.

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] James S. Albus, Roger Bostelman, and Nicholas G. Dagalakis. The NIST robocrane. *J. Field Robotics*, 10(5):709–724, 1993.
- [3] 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.
- [4] Nicolas Andreff, Bernard Espiau, and Radu Horaud. Visual Servoing from Lines. Research Report RR-4226, INRIA, 2001.
- [5] La Tuan Anh and Jae-Bok Song. Object tracking and visual servoing using features computed from local feature descriptor. In *Control Automation and Systems (ICCAS), 2010 International Conference on*, pages 1044–1048, Oct 2010.
- [6] V. Brandou, E. Malis, Patrick Rives, A-G Allais, and M. Perrier. Active stereovision using invariant visual servoing. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2326–2331, Oct 2006.
- [7] Duane C. Brown. Close-range camera calibration. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*, 37(8):855–866, 1971.
- [8] 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.
- [9] M. Carricato and J.P. Merlet. Stability analysis of underconstrained cable-driven parallel robots. *Robotics, IEEE Transactions on*, 29(1):288–296, Feb 2013.
- [10] V. Chari, A Sharma, A Namboodiri, and C.V. Jawahar. Frequency domain visual servoing using planar contours. In *Computer Vision, Graphics Image Processing, 2008. ICVGIP '08. Sixth Indian Conference on*, pages 87–94, Dec 2008.
- [11] F. Chaumette and S. Hutchinson. Visual servoing and visual tracking. In B. Siciliano and O. Khatib, editors, *Handbook of Robotics*, chapter 24, pages 563–583. Springer, 2008.

- [12] François Chaumette and S. Hutchinson. Visual servo control, Part I: Basic approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(4):82–90, 2006.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] B. Espiau, F. Chaumette, and Patrick Rives. A new approach to visual servoing in robotics. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 8(3):313–326, Jun 1992.
- [19] P.J. Esrom. Robot control (the task function approach), by c. samson, m. le borgne and b. espius oxford university press, oxford, 1991, xvii + 364, references and index (£50.00). *Robotica*, 9:447–448, 12 1991.
- [20] Olivier Faugeras. *Three-dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1993.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] R. I. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, second edition, 2004.
- [24] 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.
- [25] S.E. Landsberger and T.B. Sheridan. A new design for parallel link manipulator. In *Proc. Systems, Man and Cybernetics Conf.*, pages 812–814, Tucson, 1985.

- [26] Ezio Malis. Improving vision-based control using efficient second-order minimization techniques, 2004.
- [27] Ezio Malis, François Chaumette, and Sylvie Boudet. 2 1/2 d visual servoing. *IEEE T. Robotics and Automation*, 15(2):238–250, 1999.
- [28] W.F. Marantette. Machine tool position measurement employing multiple laser distance measurements, February 7 1995. US Patent 5,387,969.
- [29] E. Marchand and F. Chaumette. Feature tracking for visual servoing purposes. *Robotics and Autonomous Systems*, 52(1):53–70, July 2005.
- [30] 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.
- [31] J.-P. Merlet. Marionet, a family of modular wire-driven parallel robots. In Jadran Lenarcic and Michael M. Stanisic, editors, *Advances in Robot Kinematics: Motion in Man and Machine*, pages 53–61. Springer Netherlands, 2010.
- [32] 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.
- [33] Jean-Pierre Merlet and David Daney. A portable, modular parallel wire crane for rescue operations. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2010, Anchorage, Alaska, USA, 3-7 May 2010*, pages 2834–2839, 2010.
- [34] J.P. Merlet. *Les robots parallèles*. Collection robotique. Hermès, 1997.
- [35] Henri Michel and Patrick Rives. Singularities in the determination of the situation of a robot effector from the perspective view of 3 points. Rapport de recherche RR-1850, INRIA, 1993.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] D. Purves. *Neuroscience*. Sinauer Associates Incorporated, 2004.
- [40] Luis E. Ramos-Velasco. Visual servoing using discrete wavelet transform. In *World Automation Congress (WAC), 2012*, pages 1–6, June 2012.

- [41] I Sirajuddin, L. Behera, T.M. McGinnity, and S. Coleman. A position based visual tracking system for a 7 dof robot manipulator using a kinect camera. In *Neural Networks (IJCNN), The 2012 International Joint Conference on*, pages 1–7, June 2012.
- [42] G. P. Stein. Lens distortion calibration using point correspondences. In *Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97)*, CVPR '97, pages 602–, Washington, DC, USA, 1997. IEEE Computer Society.
- [43] D. Stewart. A platform with 6 degrees of freedom. *Proc. of the Institution of mechanical engineers*, 180(Part 1, 15):371–386, 1965.
- [44] Roger Y. Tsai. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. In *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL*, pages 364–374, <http://www-cgi.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/user/rgw/www/TsaiCode.html>, 1986.