

Chapitre 1

Les robots parallèles à câbles

Ce premier chapitre est consacré à la présentation d'une architecture de robot très particulière, les robots parallèles à câbles.

Deux objectifs animent l'ensemble de ce travail : il s'agit dans un premier temps de perfectionner les fonctionnalités de saisie et manipulation d'objets de ces robots, et de les rendre dans un deuxième temps robustes aux variabilités des environnements. L'utilisation d'un asservissement visuel exploitant les particularités des robots parallèles devra répondre à ces deux exigences.

Afin de présenter les spécificités des robots parallèles à câbles, 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.

1.1 Manipulateurs séries et parallèles

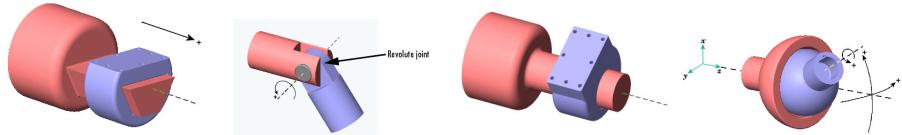
Incontestablement, l'industrie aura été le principal vecteur de développement de la robotique ces deux derniers siècles. L'introduction des robots dans les usines s'inscrit dans une démarche d'augmentation de la productivité et d'amélioration des performances, permettant dès lors de soulager le travailleur humain dans des situations de travail pénible et/ou répétitif, et d'augmenter ses compétences, en autorisant par exemple des performances de précision qu'il ne saurait fournir seul, ou en rendant possible le déplacement de charges élevées.

Si la grande diversité que recouvre aujourd'hui le terme de *robot* rend extrêmement difficile l'élaboration d'une définition générique, nous pouvons cependant en dériver des sous-catégories plus faciles à appréhender. Parmi celles-ci, nous distinguons en particulier la classe des *manipulateurs* dont la principale fonctionnalité est le déplacement et positionnement d'objets dans l'espace.

1.1.1 Définitions

Un manipulateur est 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 le long d'un axe donné et d'un mouvement de rotation autour de ce même axe ; autre exemple, une articulation sphérique (Fig.1.1d) combinera quant à elle trois rotations.



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

Figure 1.1: Différents exemples d'articulations.

On appelle *coordonnées articulaires* l'ensemble des valeurs prises par les paramètres permettant de décrire l'état des articulations à un instant donné. Les coordonnées articulaires sont exprimées dans un *espace articulaire* propre à chaque articulation. Le nombre de paramètres indépendants nécessaires à la description des coordonnées articulaires est appelé *degré de liberté* du robot. Certaines articulations ont des variables articulaires contrôlables par des actionneurs ; on parle alors d'*articulations actionnées*. S'il n'y a aucun actionnement d'une articulation, on utilise le terme d'*articulation passive*.

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. Les paramètres nécessaires à l'expression des coordonnées opérationnelles 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). 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, permettant d'exprimer les déplacements non-bloqués. Si l'on décide par exemple de contrôler les mouvements en translation, de bloquer deux rotations mais d'en laisser une complètement libre, alors 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 passive 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.

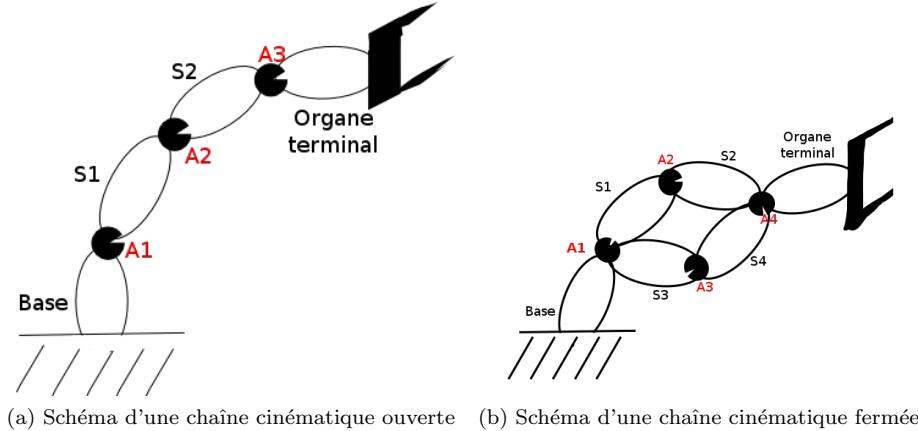


Figure 1.2: Exemples de chaînes cinématiques ouvertes et fermées : les S_i représentent les différents segments intermédiaires, tandis que les A_i correspondent aux articulations. Dans Fig.1.2a, tous les segments S_i ont un degré de connexion égal à 2 ; seuls la base et l'organe terminal ont un degré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

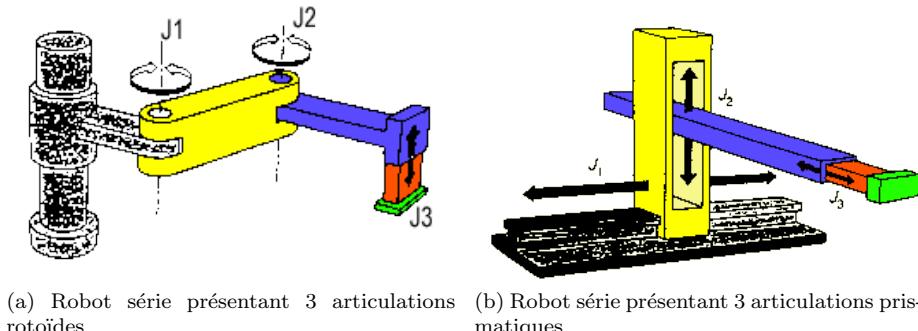


Figure 1.3: Exemples de robots séries (type SCARA et cartésien)

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

- chaque segment et articulation supporte le poids de tous ceux qui leur succèdent dans la chaîne cinématique : segments et articulations doivent donc être rigidifiés et deviennent plus lourds, ce qui pénalise la dynamique.
- les erreurs de positionnement se propagent de segments en segments en raison des effets de bras de levier ; la précision tout comme la répétabilité du manipulateur en sont affectées.
- les charges manipulables ne peuvent être élevées, en raison des sollicitations en flexion et de l'effet de bras de levier sur les segments.

Ainsi, une architecture série amène souvent à un dispositif imposant, dont la précision, la dynamique et la faible capacité de charges peuvent se révéler insuffisants pour certaines tâches.

Grâce à leurs structures en chaîne cinématique fermée, les architectures parallèles présentent une alternative efficace aux 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 [30] :

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], [50] (Fig.1.5a,1.5b) et le robot Delta [17] (Fig.1.5c).

Initialement développée pour des applications liées à l'industrie automobile (Fig.1.5a), la plate-forme de Gough-Stewart a par la suite été utilisée dans des applications diverses parmi lesquelles les simulateurs de vols (Fig.1.5b). Sa plate-forme mobile peut être déplacée selon 6 degrés de liberté (3 translations + 3 rotations) à l'aide de six jambes indépendantes constituées en partant de la base d'un cardan passif suivie d'une articulation prismatique actionnée, dont l'extrémité est connectée à la plate-forme par une rotule passive.

Le robot Delta (Fig.1.5c) 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 rotative à un levier, ce levier étant lui-même relié à un parallélogramme par une seconde articulation rotative, une troisième articulation rotative liant ce segment à l'organe terminal. Le robot Delta peut atteindre des vitesses allant jusqu'à 10 m/s et supporter des accélérations jusqu'à 15G [45], 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*) ; ce point est toutefois discuté dans [11] [43] et – s'il semble être avéré dans la plupart des cas – peut faire l'objet d'exceptions.

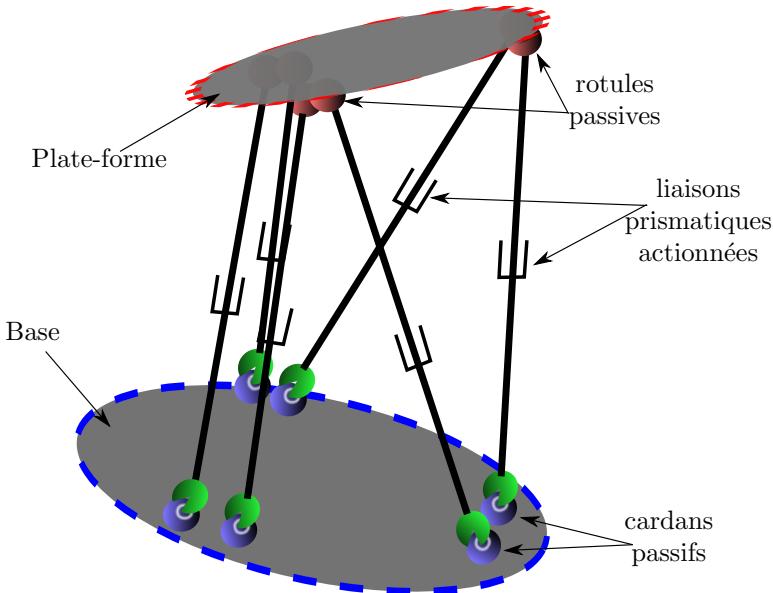


Figure 1.4: Schéma d'une plate-forme de Gough-Stewart

- une capacité de charge élevée due à la **répartition** de la charge sur les différentes jambes.
- une rigidité élevée car les éléments de chaînes sont en général 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 (les coordonnées articulaires et la position de l'organe terminal)
- des positions dites *singulières* pouvant conduire à une perte de contrôle du manipulateur, et qui limitent l'espace de travail [29], [44].
- un espace de travail restreint par les limites de variation des variables articulaires (Fig.1.6). 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 limitation de l'espace de travail, qui est une contrainte forte des mécanismes parallèles [3], [28]. 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*).



(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 1.5: Exemples de robots parallèles

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 permettent de contrôler la longueur des câbles.

Dans ce but, plusieurs types de systèmes peuvent être utilisés, parmi lesquels nous pouvons citer :

- un tambour actionné par un moteur rotatif sur lequel s'enroule ou se

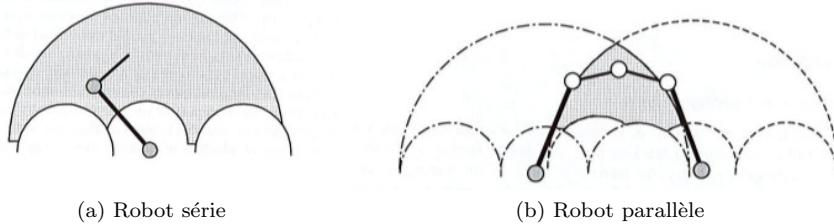


Figure 1.6: Espaces de travail d'un robot série (à gauche) et d'un robot parallèle (à droite) pour des limites articulaires égales.

déroule le câble (Fig.1.7a). La mesure de la longueur du câble déroulé est obtenue en mesurant la rotation du tambour ; elle sera relativement imprécise si l'enroulement n'est pas guidé [34].

- le câble est attaché au chariot d'un actionneur linéaire, un système de démultiplication à poulies permettant d'amplifier le déplacement du câble (Fig.1.7b). La mesure du déplacement du chariot permet une estimation précise de la longueur du câble [34].

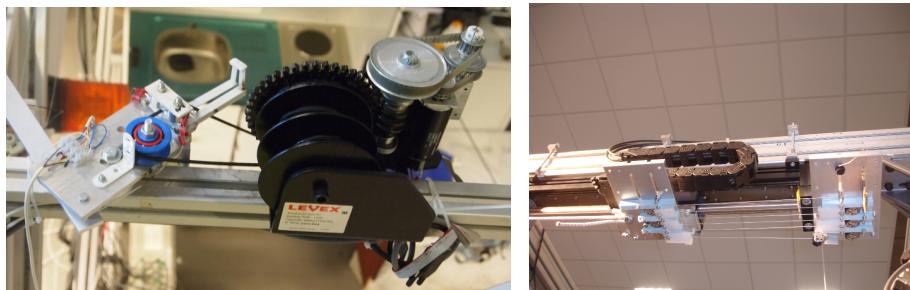


Figure 1.7: Deux types d'articulations et d'actionnement pour un robot à câble

Dans tous les cas, ces systèmes permettent d'obtenir une très large variation sur les longueurs des câbles, résolvant ainsi le problème de l'espace de travail. On a pu ainsi construire des robots travaillant sur des volumes importants, pour des applications aussi diverses que de la surveillance environnementale [26] [6], des opérations de sauvetage [39] [49] [8], de l'inspection de façades de bâtiments [25], de la photographie 3D à grande échelle [19] ou encore de l'impression de bâtiments [7]. A titre d'exemple, le volume de travail du robot à câbles développé dans le cadre du projet CoGiRo¹ (Fig.1.10c) est de $15m \times 11m \times 6m$ [38], tandis que le Marionet-Crane Fig.1.8 conçu pour des opérations de sauvetage peut être déployé sur un volume de $75m \times 45m \times 30m$ ².

¹ <http://www.agence-nationale-recherche.fr/Colloques/RencontresduNumerique2013/fichiers/posters/v3/COGIRO.pdf>

²<http://www-sop.inria.fr/coprin/prototypes/main.html>

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 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 [41]. On peut cependant considérer la gravité comme une force unilatérale et la représenter comme un câble virtuel jouant le rôle d'opposition : il est alors envisageable de n'utiliser que n câbles pour contrôler n degrés de liberté.



Figure 1.8: Le robot de sauvetage **Marionet-Crane** déployé dans les locaux d'INRIA

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

- en *configuration suspendue* (Fig.1.9b), la gravité agit comme un câble virtuel : les actionneurs sont fixés généralement au point le plus haut du dispositif, et n sont suffisants pour déplacer et orienter l'organe terminal selon n degrés de liberté, sous l'hypothèse toutefois que les n câbles sont bien en tension. On retrouve parfois ce type de configuration dans la littérature sous le nom de *grue/crane*. A titre d'exemple, le manipulateur *Nist Spider* [2] présente une configuration suspendue.
- en *configuration pleinement contrainte* (Fig.1.9a), 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.

Une spécificité des manipulateurs parallèles à câbles qui les distingue 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

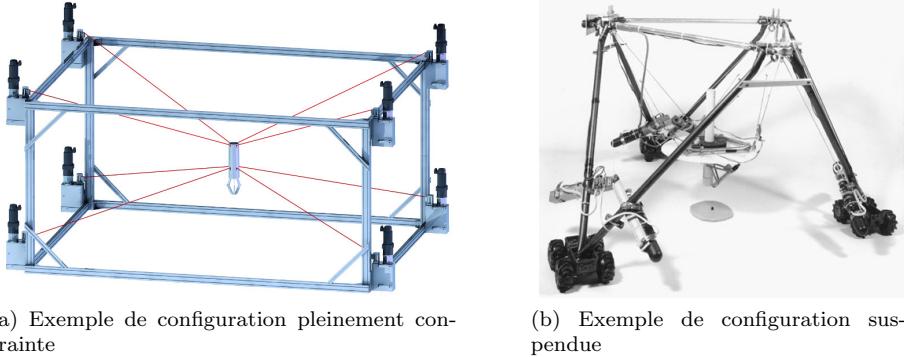


Figure 1.9: Deux configurations possibles pour un robot parallèle à câble

- l'espace de travail est considérablement agrandi par rapport aux robots parallèles à jambes rigides, les variations des longueurs de câbles pouvant atteindre des valeurs très supérieures à ce qu'il est possible de réaliser avec des actionneurs prismatiques rigides [46].
- l'équipage mobile est très léger, ce qui favorise la dynamique [27].
- le comportement des câbles (non-déformables, élastiques, pesants, ...) peut complexifier sérieusement le modèle du robot [47] [31] [5]
- 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 [37].

1.2.1 Robots parallèles à câbles représentatifs

Parmi les nombreux prototypes de CDPR ayant été réalisés [27] [20] [42], nous nous contenterons d'évoquer quelques exemples représentatifs.

NIST Robocrane :

Développé au début des années 90, Robocrane [3] (Fig.1.10a) s'inspire de la géométrie de la plate-forme de Gough-Stewart : il s'agit de fait d'une architecture Gough-Stewart inversée, dont les jambes rigides sont remplacées par des câbles. Le robot NIST Robocrane entre donc dans la catégorie des manipulateurs en configuration suspendue. Mesurant un peu plus de 6 mètres de hauteur, ce robot peut supporter des charges de l'ordre de plusieurs centaines de kilos (entre 800 et 900 kg), pour une vitesse maximale de 3cm/s . Ses applications sont nombreuses et vont de la maintenance industrielle (particulièrement pour l'aviation) à l'intervention à grande échelle lors d'incendies en zones d'extraction pétrolières [9] [10].

SEGESTA :

Déployé dans les locaux de l'université de Duisburg dans l'objectif de tester des algorithmes de contrôles rapides et de planification de trajectoire [23], le



Figure 1.10: Exemples de robots parallèles à câbles

prototype **SEGESTA** (Fig.1.10b) est un robot parallèle actionné par 7 ou 8 câbles élastiques dans une configuration pleinement contrainte. Il peut atteindre des vitesses de $7m/s$ et supporter des accélérations de l'ordre de $100m/s^2$ [12].

CoGiRo :

Actionné par 8 câbles en configuration pleinement contrainte pour contrôler 6 degrés de liberté, le robot développée dans le cadre du projet CoGiRo (Fig.1.10c) [4], [18] par le LIRMM et Tecnalia peut évoluer dans un espace de travail de $15m \times 11m \times 6m$ et manipuler des charges de l'ordre de 500kg, ce qui le qualifie notamment pour des applications industrielles de manipulations lourdes.

1.2.2 Marionet-Assist

Les **Marionet** sont une famille de robots à câbles développés par l'EPI Hephaïstos pour des applications diverses [35] :

- **Marionet-Crane** (Fig.1.11a) : intervention à grande échelle pour des opérations de sauvetage dans des situations de catastrophe naturelle
- **Marionet-VR** (Fig.1.11b) : utilisation dans des environnements de réalité virtuel en tant que générateur de mouvement et comme interface haptique.
- **Marionet-Rehab** (Fig.1.11c) : 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.1.11d) : 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 $75m \times 45m \times 30m$, 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 1.11: 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 personnes. 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.1.12a)
- aide au transfert d'une position à une autre (couché-assise, assise-debout, ...) pour une personne (des toilettes au fauteuil par exemple) (Fig.1.12b)
- aide aux aidants pour le transfert de personnes (déplacement du lit vers un fauteuil par exemple) afin de réduire la pénibilité de leur tâche. (Fig.1.12c)



(a) Simple soutien au déplacement dans une pièce de vie (b) Transfert de position assise/levé (c) Déplacement autonome d'un lieu de vie (lit) vers un dispositif de déplacement (fauteuil)

Figure 1.12: Différents types de fragilités motrices dans des situations 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 le plus compatible avec l'ensemble de ces exigences. **Marionet-Assist** a ainsi été conçu et déployé dans un appartement-témoin (Fig.1.14a,1.14b) 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.1.13a).

- les câbles sont attachés en un même point à la plate-forme : c'est la configuration N-1 sur laquelle nous reviendrons plus en détails dans la section finale de ce chapitre (Fig.1.13b).
- certains câbles seulement sont attachés en un même point sur la plate-forme. Cette disposition permet souvent de découpler les modèles géométriques, ce qui simplifie leur résolution. 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 , notée 4-3-1, le contrôle des trois câbles 0, 1, 2 permet le contrôle de la position du point \mathbf{B}_0 , le dernier câble permettant le contrôle d'une orientation. (Fig.1.13c).

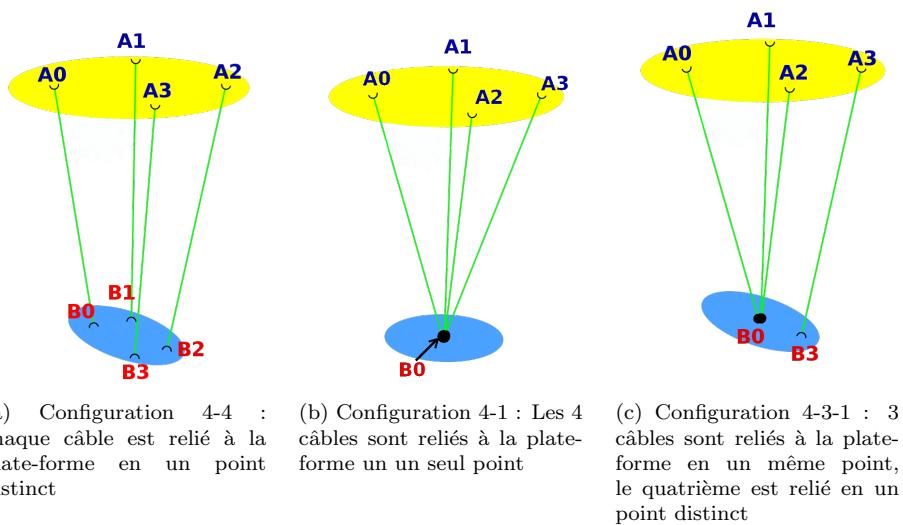


Figure 1.13: Exemples de configurations avec 4 câbles

Pour l'ensemble des expériences menées dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé la configuration 4 – 1 (Fig.1.13b) 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.

Les câbles de ce robot 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.1.14d). Toutefois, en l'absence de guide pour l'enroulement et en raison de l'existence possible de plusieurs couches de câble sur le tambour, la simple mesure de la rotation du tambour ne permet pas de connaître avec exactitude la longueur déroulée des câbles ; 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, par simple contact électrique, au point \mathbf{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 fonction-

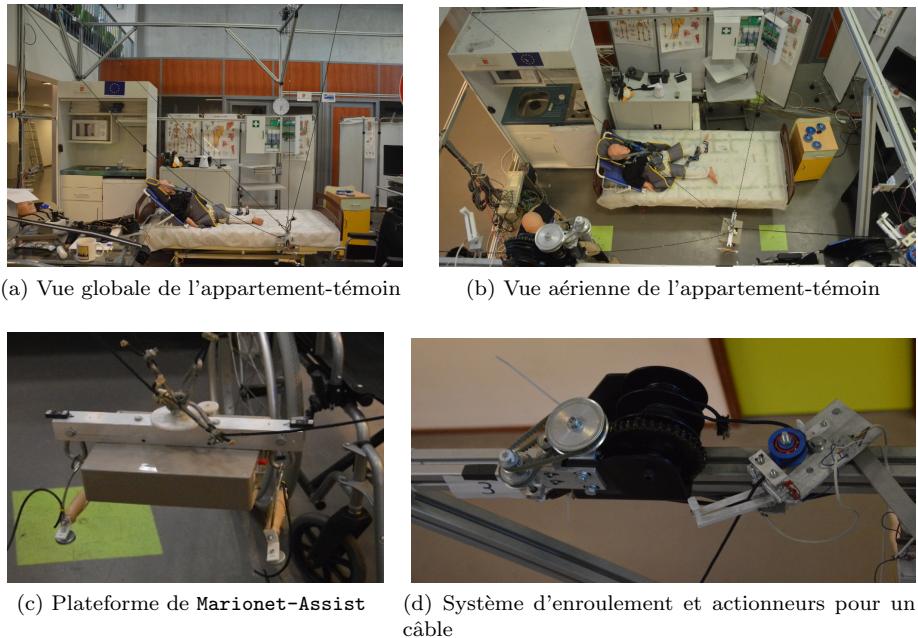


Figure 1.14: Marionet-Assist

nalités 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.

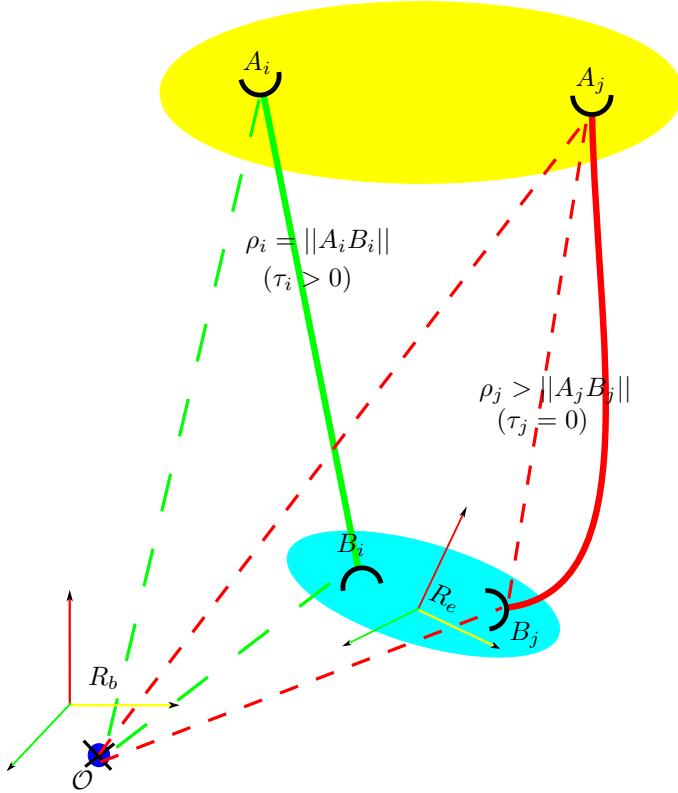
1.3 Modèles géométriques et cinématiques des robots parallèles à câbles

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

1.3.1 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. Nous supposerons que ce point est fixe.

1.3. MODÈLES GÉOMÉTRIQUES ET CINÉMATIQUES DES ROBOTS PARALLÈLES À CÂBLES 15



- 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
- τ_i : tension exercée sur l'organe terminal par le câble i
- \mathbf{J} : jacobienne du robot (définie ultérieurement)

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. Dans ce cas, nous avons $\rho_i = l_i$.

1.3.2 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.1.15a).

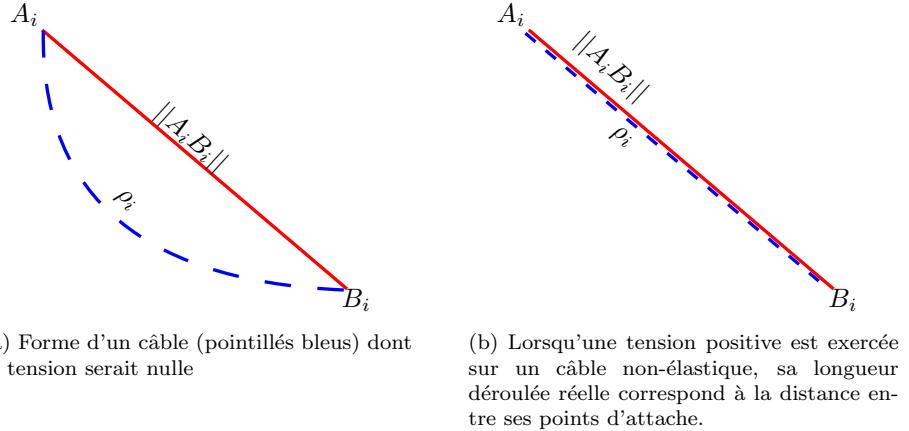


Figure 1.15: Dans le cas d'un câble détendu (tension nulle), la longueur réelle (en bleu pointillé) sera supérieure à la distance entre les deux points d'attache (en rouge plein) ; de plus, la forme du câble sera telle qu'il y a risque d'intersection avec d'autres câbles, avec son environnement, ... Dans le cas d'un câble tendu (tension strictement positive), la longueur réelle ρ_i (en bleu pointillé) sera égale à la distance entre les points d'attache (en rouge plein)

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, l'existence d'une relation algébrique entre ρ_i et \mathbf{B}_i dépend de la valeur des tensions τ_i . Dès lors, tout comme dans l'approche développée par [14], nous parlerons donc de modèle géométrico-statique inverse, requérant l'étude de l'équilibre statique.

1.3.3 Equilibre statique

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

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

Sous l'hypothèse que les forces mécaniques de frottement et de résistance peuvent être ici négligées, nous considérons que les forces appliquées sur la plate-forme sont la gravité et les efforts exercés par chacun des câbles au point \mathbf{B}_i .

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 $\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{A}_i\mathbf{B}_i}{\rho_i}$.

1.3. MODÈLES GÉOMÉTRIQUES ET CINÉMATIQUES DES ROBOTS PARALLÈLES À CÂBLES 17

Soit le vecteur \mathbf{W}_i :

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

avec p_i un vecteur allant d'un premier point de référence arbitraire C localisé sur la plate-forme au point \mathbf{B}_i .

L'action mécanique exercée par le câble sur la plate-forme est représentée par le torseur $\tau_i \mathbf{W}_i$, où τ_i est un scalaire positif représentant l'intensité de la tension.

Soit \mathbf{W}_g le vecteur indiquant la direction dans laquelle la gravité est exercée dans le référentiel choisi, pour n câbles. Le torseur des efforts dûs à la gravité, d'intensité g , est alors donné par $mg\mathbf{W}_g$, et nous pouvons réécrire (1.3) de la manière suivante :

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

En posant $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^T$, \mathbf{W} la matrice $6 \times n$ dont les colonnes sont les n vecteurs \mathbf{W}_i , et en isolant $\mathbf{F} = mg\mathbf{W}_g$, la relation (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 cinématique inverse*.

1.3.4 Modèle géométrico-statique inverse (MGSI)

Connaissant les paramètres de pose de la plate-forme, on veut en déduire les longueurs 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, uniques, ρ_i . Si $m = 6$, la solution de l'équilibre statique est unique ; si les τ_i sont tous positifs, alors le MGI a une solution unique.

Si $m > 6$, l'équilibre statique possède en théorie une infinité de solutions (nous ne devons toutefois considérer que les ensembles de solutions pour lesquelles les τ_i sont tous strictement positifs). Toutefois, l'applicabilité de ces solutions revient à supposer un contrôle parfait des ρ_i : si la longueur ρ_i réelle est inférieure à la valeur calculée et que la tension dans ce câble est non-nulle, alors la plate-forme ne sera pas dans la pose souhaitée. A l'inverse, si la longueur réelle ρ_i est supérieure à la valeur calculée, alors la tension dans ce câble sera nulle si la pose est atteinte.

Il est aussi 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 [14].
- L'équilibre statique est vérifié uniquement si l'ensemble des déterminants $(m + 1) \times (m + 1)$ de la matrice \mathbf{W} sont nuls [16]. Si tous les τ_i sont strictement positifs, le modèle géométrico-statique possède alors une solution, mais correspondant à un mode dégradé du système.

1.3.5 Modèle géométrico-statique direct

Résoudre le modèle géométrique direct consiste à calculer les coordonnées opérationnelles à partir de la donnée des coordonnées articulaires actionnées. 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 [30], et nous allons voir qu'il peut être encore plus complexe dans le cas des CDPR.

On distingue 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} . Si l'on suppose tous les câbles tendus, les m équations du modèle géométrique inverse constituent un système surcontraint qui n'admet en général pas de solutions. Il est alors nécessaire de supposer qu'au moins $m - 6$ câbles sont non-tendus.
- $m = 6$: dans ce cas, les équations géométriques et celles de la statique sont découplées : cette situation peut être ramenée à son équivalent pour les robots parallèles classiques [24] [51] [48] [32]. 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}), et le modèle géométrique inverse ne fournit que $m < 6$ équations. On complètera dès lors ce 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 6 par l'équilibre statique). On obtient alors bien un système carré. Dans le cas $m = 5$, on a en effet 11 équations pour les robots parallèles à câbles, contre 6 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 $\forall i \in [1, m], \rho_i = \|\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i\|$. On ne peut pas 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 ou plusieurs des équations du modèle géométrique ne sera plus valide. Il faut donc considérer la combinatoire des systèmes carrés avec $6 + m - p$ équations ($p \in [1, m - 1]$) et vérifier la validité de leurs solutions, c'est-à-dire des résultats $\tau_i > 0$ et $\rho_i > \|\mathbf{A}_i \mathbf{B}_i\|$ pour les câbles non-tendus. La résolution de ces cas est encore un problème ouvert, même si des résultats sont disponibles [1] [13] [15] [40].

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.

1.3. MODÈLES GÉOMÉTRIQUES ET CINÉMATIQUES DES ROBOTS PARALLÈLES À CÂBLES19

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.

1.3.6 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 $\mathbf{V} = (\mathbf{v}, b\Omega)$ où \mathbf{v} dénote la vitesse de translation et Ω les vitesses angulaires.

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 (1.8) et (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 (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 $(\frac{\partial H_2}{\partial \Theta})$ est bien inversible, nous pouvons définir une matrice \mathbf{H} de manière à obtenir la relation suivante :

$$\dot{\Theta} = \mathbf{H} \dot{\mathbf{X}} \quad (1.13)$$

Toutefois, le vecteur $\dot{\mathbf{X}}$ ainsi déterminé ne correspond pas à \mathbf{V} , car il n'existe pas de paramétrisation de l'orientation de la plate-forme telle que les dérivées en temps des paramètres puissent constituer la vitesse angulaire [33]. Nous définissons toutefois le vecteur :

$$\boldsymbol{\omega}_C = \begin{pmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} \quad (1.14)$$

qui correspond à une paramétrisation de l'orientation par les angles d'Euler (ψ, θ, ϕ) . Il existe donc une matrice \mathbf{U} telle que $\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{U}\boldsymbol{\omega}_C$.

On a donc :

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \mathbf{U}^{-1} \end{pmatrix} \mathbf{V} = \mathbf{H}'\mathbf{V} \quad (1.15)$$

ce qui nous permet d'écrire :

$$\dot{\Theta} = \mathbf{H}\mathbf{H}'\mathbf{V} \quad (1.16)$$

et l'on peut montrer que $\mathbf{H}\mathbf{H}' = \mathbf{J}^{-1}$, où \mathbf{J} est la même matrice que celle intervenant dans les équations de la statique (1.7). On notera qu'elle dépend des paramètres de pose alors que seules les coordonnées articulaires sont mesurées. Il est donc nécessaire pour l'obtenir de résoudre le *MGD*.

1.4 Les robots N-1

On parle de configuration N-1 pour un robot parallèle à N câbles en configuration suspendue lorsque l'ensemble des câbles sont reliés à la plate-forme en un même point \mathbf{B} . L'ensemble des points \mathbf{B}_i étant confondus, le contrôle en orientation n'est alors plus possible : c'est donc une architecture de robot à 3 degrés de liberté dédiée aux déplacements en translation. Entre autres avantages, nous n'avons plus à nous préoccuper des interférences entre câbles.

Une caractéristique importante de cette configuration particulière est que, lorsque $N > 3$, seuls trois câbles au plus seront en tension positive et permettront de contrôler les déplacements de la plate-forme [36] (le cas 4-1 sera expliqué plus en détails à l'occasion du chapitre consacré aux configurations de câbles). Il est facile dans cette configuration de calculer l'espace de travail du robot pour un triplet de câbles en tensions strictement positives. L'ajout dès lors de câbles supplémentaires permet sous certaines conditions d'augmenter le volume de l'espace de travail.

Avec cette propriété, nous voyons qu'avoir plus de trois câbles permettra éventuellement de disposer de différents jeux de trois câbles en tension pour une pose donnée. Ces jeux de trois câbles présentant chacun des performances différentes (répartition des tensions dans les câbles, précision du positionnement, ...), nous voyons ici une possibilité d'amélioration des performances qui fera l'objet du chapitre ??.

1.4.1 Modèles géométriques et cinématiques

MGSD :

Soient N câbles dont nous connaissons les longueurs ρ_1, \dots, ρ_N . 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 qui indiquent que le point \mathbf{C} est à l'intersection de trois sphères de centre \mathbf{A}_i et de rayon ρ_i (Fig.1.16). Ce problème est trivial : le système admet deux solutions symétriques par rapport au plan passant par les trois points \mathbf{A}_i . La solution au-dessus de ce

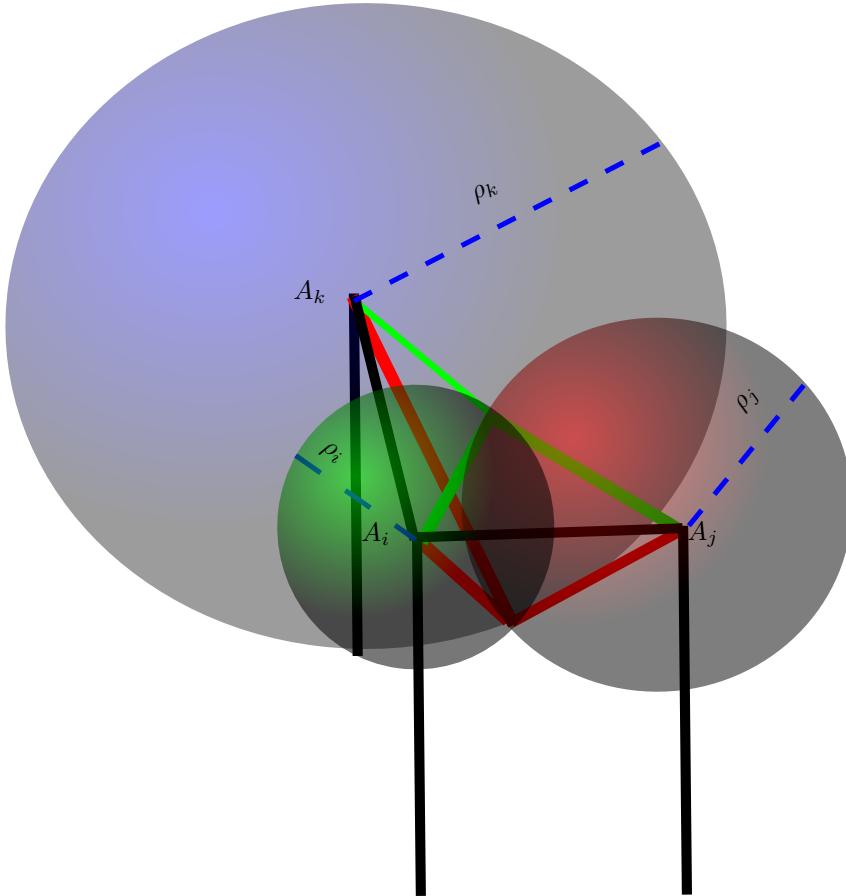


Figure 1.16: Représentation des points d'intersection des trois sphères de centre \mathbf{A}_i (resp. \mathbf{A}_j , \mathbf{A}_k) et de rayon ρ_i (resp. ρ_j , ρ_k). Dans ce cas précis, la solution la plus haute est au-dessus du plan contenant les points \mathbf{A}_i , \mathbf{A}_j et \mathbf{A}_k : elle ne peut se retrouver en équilibre statique, aucun câble ne pouvant fournir une force opposée à la force de gravité.

plan imposerait des tensions strictement négatives, donc seule la solution se trouvant en-dessous du plan est valide. Cette solution géométrique ne permet cependant pas d'affirmer que les tensions τ dans les câbles sont toutes positives. On peut toutefois montrer que si cette pose se trouve bien dans l'espace de travail correspondant au triplet de câbles en tension, alors nous avons bien $\tau > 0$ [36].

Il faut cependant vérifier que nous n'avons pas une pose valide avec moins de 3 câbles en tension. Dans le cas où deux câbles seulement sont en tension, le point \mathbf{C} soit se trouver dans le plan vertical contenant les deux points \mathbf{A}_i . On se ramène donc à un problème plan trivial. Enfin, lorsque un seul câble est en tension strictement positive, le point \mathbf{C} se trouve sur la droite verticale prolongeant le point \mathbf{A}_i , ce qui ne pose aucun problème de résolution.

MGSI :

Le modèle géométrico-statique inverse est relativement simple dans ce contexte. Connaissant les paramètres de pose, les longueurs de câbles peuvent être

immédiatement déduite à partir de la relation

$$\rho_i = \|\mathbf{A}_i \mathbf{B}\|_2 \quad (1.17)$$

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 :

Soit $\mathbf{A}_i \mathbf{B} = \mathbf{X}_i = (x, y, z)$. Si nous dérivons la relation précédente (1.17), nous obtenons :

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

Dès lors, on obtient :

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

On en déduit que pour le câble i la ligne correspondante de la matrice Jacobienne inverse est :

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

Références

- [1] G. Abbasnejad and M. Carricato. Direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots with five cables. In Federico Thomas and Alba Perez Gracia, editors, *Computational Kinematics*, volume 15 of *Mechanisms and Machine Science*, pages 59–66. Springer Netherlands, 2014.
- [2] 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.
- [3] J. S. Albus, R. Bostelman, and N. G. Dagalakis. The NIST robocrane. *J. Field Robotics*, 10(5):709–724, 1993.
- [4] J. Alexandre Dit Sandretto, D. Daney, M. Gouttefarde, and C. Baradat. Calibration of a fully-constrained parallel cable-driven robot. Rapport de recherche RR-7879, INRIA, February 2012.
- [5] L. Blanchet and J-P. Merlet. Interference detection for cable-driven parallel robots (CDPRs). In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2014 IEEE/ASME International Conference on*, pages 1413–1418, July 2014.
- [6] P. H. Borgstrom, B. L. Jordan, B. J. Borgstrom, M. J. Stealey, G. Sukhatme, M. A. Batalin, and W. J. Kaiser. NIMS-PL: A cable-driven robot with self-calibration capabilities. *Robotics, IEEE Transactions on*, 25(5):1005–1015, Oct 2009.
- [7] P. Bosscher, R. L. Williams, S. L. Bryson, and D. Castro-Lacouture. Cable-suspended robotic contour crafting system. *Automation in construction*, 17(1):45–55, 2007. eng.
- [8] P. Bosscher, R. L. Williams, and M. Tummino. A concept for rapidly-deployable cable robot search and rescue systems. *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 7, 20058.
- [9] R. Bostelman, J. Albus, N. Dagalakis, A. Jacoff, and J. Gross. Applications of the NIST robocrane.
- [10] Roger V. Bostelman and J. S. Albus. RoboCrane and EMMA applied to waste storage tank remediation. In *Proc. American Nuclear Society Seventh Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, 1997.

- [11] S. Briot and I. Bonev. Are Parallel Robots More Accurate than Serial Robots? *CSME Transactions*, 31(4):445–456, November 2007.
- [12] T. Bruckmann, A. Pott, D. Franitz, and M. Hiller. A modular controller for redundantly actuated tendon-based Stewart platforms. *EuCoMeS, Obergurgl, Austria, In*, 2006.
- [13] M. Carricato and G. Abbasnejad. Direct geometrico-static analysis of under-constrained cable-driven parallel robots with 4 cables. In T. Bruckmann and A. Pott, editors, *Cable-Driven Parallel Robots*, volume 12 of *Mechanisms and Machine Science*, pages 269–285. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [14] M. Carricato and J-P. Merlet. Geometrico-static analysis of under-constrained cable-driven parallel robot. In *ARK*, pages 309–320, Piran, 28 june – 1 july 2010.
- [15] M. Carricato and J-P. Merlet. Direct geometrico-static problem of under-constrained cable-driven parallel robots with three cables. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 3011–3017, Shanghai, 9-13 may 2011.
- [16] M. Carricato and J-P. Merlet. Stability analysis of underconstrained cable-driven parallel robots. *Robotics, IEEE Transactions on*, 29(1):288–296, Feb 2013.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] J-D. Deschenes, P. Lambert, S. Perreault, N. Martel-Brisson, N. Zoso, A. Zaccarin, P. Hebert, S. Bouchard, and C. M. Gosselin. A cable-driven parallel mechanism for capturing object appearance from multiple viewpoints. In *3D Digital Imaging and Modeling, 2007. 3DIM '07. Sixth International Conference on*, pages 367–374, Aug 2007.
- [20] A. Fattah and S.K. Agrawal. On the design of cable-suspended planar parallel robots. *ASME J. of Mechanical Design*, 127(5):1021–1028, september 2005.
- [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] M. Hiller, S. Fang, S. Mielczarek, R. Verhoeven, and D. Franitz. Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 40(4):429 – 445, 2005.

- [24] M. L. Husty. An algorithm for solving the direct kinematic of Stewart-Gough-type platforms. In *Mechanism and machine theory*, pages 1994–94, 1994.
- [25] M. Izard, J-B. Gouttefarde, C. Baradat, D. Culla, and D. Sallé. Integration of a parallel cable-driven robot on an existing building façade. In *First international conference on cable-driven parallel robots*, Cable-Driven Parallel Robots, pages 149–164, Stuttgart, Germany. Springer.
- [26] B. L. Jordan, M. A. Batalin, and W. J. Kaiser. NIMS RD: A rapidly deployable cable based robot. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pages 144–150, April 2007.
- [27] S. Kawamura, W. Choe, S. Tanaka, and S. R. Pandian. Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system. In *Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 215–220 vol.1, May 1995.
- [28] 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.
- [29] J-P. Merlet. Singular configurations of parallel manipulators and Grassmann geometry. *I. J. Robotic Res.*, 8(5):45–56, 1989.
- [30] J-P. Merlet. *Les robots parallèles*. Collection robotique. Hermès, 1997.
- [31] J-P. Merlet. Analysis of the influence of wires interference on the workspace of wire robots. In J. Lenarčič and C. Galletti, editors, *On Advances in Robot Kinematics*, pages 211–218. Springer Netherlands, 2004.
- [32] J-P. Merlet. Solving the forward kinematics of a Gough-type parallel manipulator with interval analysis. *The International Journal of Robotics Research*, 23(3):221–235, 2004.
- [33] J-P. Merlet. Jacobian, manipulability, condition number and accuracy of parallel robots. In Sebastian Thrun, Rodney Brooks, and Hugh Durrant-Whyte, editors, *Robotics Research*, volume 28 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*, pages 175–184. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] J-P. Merlet. The kinematics of the redundant N-1 wire driven parallel robot. In *ICRA*, pages 2313–2318. IEEE, 2012.

- [37] J-P. Merlet. Wire-driven parallel robot: Open issues. In Vincent Padois, Philippe Bidaud, and Oussama Khatib, editors, *Romansy 19 – Robot Design, Dynamics and Control*, volume 544 of *CISM International Centre for Mechanical Sciences*, pages 3–10. Springer Vienna, 2013.
- [38] J-P. Merlet and J. Alexandre dit Sandretto. The forward kinematics of cable-driven parallel robots with sagging cables. In Andreas Pott and Tobias Bruckmann, editors, *Cable-Driven Parallel Robots*, volume 32 of *Mechanisms and Machine Science*, pages 3–15. Springer International Publishing, 2015.
- [39] J-P. Merlet and Daney D. 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.
- [40] N. Michael, S. Kim, J. Fink, and V. Kumar. Kinematics and Statics of Cooperative Multi-Robot Aerial Manipulation with Cables. In *ASME International Design Engineering Technical Conference (DETC 2009)*, San Diego, CA, 2009.
- [41] A. Ming and T. Higuchi. Study on multiple degree of freedom positioning mechanisms using wires, Part II: Development of a planar completely restrained positioning mechanism. *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, 28(3):235–242, september 1994.
- [42] R. Nan, D. Li, C. Jin, Q. Wang, L. Zhu, W. Zhu, H. Zhang, Y. Yue, and L. Qian. The five-hundred aperture spherical radio telescope (FAST) project. *International Journal of Modern Physics D*, 20:989–1024, 2011.
- [43] R-M.A. Nzue, J-F. Brethe, E. Vasselin, and D. Lefebvre. Comparative analysis of the repeatability performance of a serial and parallel robot. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 63–68, Oct 2010.
- [44] F. C. Park and J. W. Kim. A singularity classification for closed chains. In Jadran Lenarvcivc and Manfred Husty, editors, *Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control*, pages 483–492, Strobl, Austria, 1998. Kluwer Academic Publishers.
- [45] Shi Baek Park, Han Sung Kim, Changyong Song, and Kyunghwan Kim. Dynamics modeling of a Delta-type parallel robot. In *Robotics (ISR), 2013 44th International Symposium on*, pages 1–5, Oct 2013.
- [46] N. Riehl, M. Gouttefarde, C. Baradat, and F. Pierrot. On the determination of cable characteristics for large dimension cable-driven parallel mechanisms. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 4709–4714, May 2010.
- [47] N. Riehl, M. Gouttefarde, S. Krut, C. Baradat, and F. Pierrot. Effects of non-negligible cable mass on the static behavior of large workspace cable-driven parallel mechanisms. In *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, pages 2193–2198, May 2009.

- [48] F. Rouillier. Real root counting for some robotics problems. In Jean-Pierre Merlet and Bahram Ravani, editors, *Computational Kinematics '95*, volume 40 of *Solid Mechanics and Its Applications*, pages 73–82. Springer Netherlands, 1995.
- [49] T. Satoshi and K. Shigeru. A portable parallel motion platform for urban search and surveillance in disasters. pages 537–540, 2002.
- [50] D. Stewart. A platform with 6 degrees of freedom. *Proc. of the Institution of mechanical engineers*, 180(Part 1, 15):371–386, 1965.
- [51] C. W. Wampler. Forward displacement analysis of general six-inparallel SPS (Stewart) platform manipulators using soma coordinates. In *Mechanism and Machine Theory*, pages 331–337, 1996.