

# Chapitre 1

## Asservissement visuel des robots à câbles

Les manipulateurs parallèles à câbles peuvent s'avérer un choix pertinent d'architecture dès lors que tâche requiert tout ou partie des propriétés suivantes :

- pouvoir être effectuée dans un large espace de travail
- pouvoir manipuler des charges importantes
- pouvoir être déployée rapidement
- garantir une précision et une dynamique suffisantes

Toutefois, nous avons vu que le contrôle de tels robots posait plusieurs problèmes, parmi lesquels :

- des modèles géométriques et cinématiques plus complexes que pour les robots séries
- un câble ne pouvant exercer qu'une force unilatérale, il est possible qu'il se retrouve avec une tension nulle ; cela peut donner lieu à des changements discontinus des valeurs de tension pour chaque câble, voire la perte d'un ou plusieurs degrés de liberté
- des incertitudes mécaniques, particulièrement sur la longueur réelle de déploiement d'un câble si nous utilisons un moteur rotatif comme actionneur (le diamètre d'enroulement n'étant alors qu'une approximation).

Pour ces raisons, la précision d'une pose dépendra à la fois de son histoire (selon la trajectoire qui y a conduit et l'ensemble des câbles qui auront contribué à son obtention, le positionnement final pourra différer) et de sa robustesse aux incertitudes mécaniques, méthodologiques (simplification des modèles d'élasticité et de pesance des câbles par exemple) et de la précision des calculs.

L'asservissement visuel a donc été proposée à plusieurs reprises afin de résoudre tout ou partie de ces inconvénients. Les stratégies suivantes ont par exemple été mises en place :

- une caméra déportée filme l'organe terminal, et par un asservissement en position, entreprend de corriger les erreurs de pose de celui-ci. Sont requis ici que la scène soit dégagée, que la caméra ait un champs de vision suffisamment grand pour pouvoir appréhender l'ensemble de l'espace de travail. Pour autant, une telle méthode ne permet pas de gérer les questions de tensions positives ou nulles dans les câbles.
- plusieurs caméras sont utilisées pour filmer les départs des câbles. En utilisant la géométrie plückerienne, ceci permet d'obtenir une estimation précise de la Jacobienne inverse. Pour autant, la question de la répartition des forces dans les câbles n'est là non plus pas considérée. Une telle stratégie suppose que tous les câbles soient en tension, ce qui est par exemple dans certaines architectures impossible, et peut donc conduire à une commande erronée.

Pour autant, utilisées ensemble, ces deux stratégies devraient pouvoir permettre d'assurer la manipulation dans la plupart des cas, sans pour autant le garantir.

Notre objectif ici est donc double : construire dans un premier temps une loi de commande qui soit aussi indépendante que possible des paramètres de pose et des coordonnées articulaires, contrôler dans un deuxième temps les câbles qui seront en tension pour une trajectoire donnée. En effet, dès lors que nous connaissons les câbles qui sont en tension, nous obtenons le rang de la Jacobienne correspondante. Nous pouvons ainsi affiner la commande en cessant de considérer le robot global, pour ne plus prendre en compte que la partie correspondant réellement aux câbles qui agissent sur le déplacement. Nous utiliserons alors ce que nous définirons plus tard comme étant la *Jacobienne du sous-robot associée à une configuration de câbles*. L'utilisation d'une loi de commande articulaire exploitant des informations visuelles adaptées permettra de s'abstraire lors d'une commande cinématique à la fois des incertitudes liées à la commande du robot, mais également aux problèmes soulevés dans le chapitre précédent concernant l'estimation de la matrice d'interaction.

Ce chapitre est consacré à l'élaboration d'une telle loi de commande. Pour cela, nous présenterons dans un premier temps les spécificités d'un asservissement visuel classique de robots parallèles à câbles. Dans une seconde section, nous montrerons dans quelle mesure nous pouvons y trouver des améliorations concernant la précision du manipulateur et la robustesse aux erreurs et incertitudes diverses. La troisième section développera les conditions d'une loi de commande articulaire reposant sur une première estimation de la matrice d'interaction articulaire et un schéma itératif assurant la convergence vers une trajectoire linéaire. Enfin, une quatrième section présentera les conclusions de ce premier volet de notre étude. L'ensemble des simulations et validations expérimentales se trouveront dans le chapitre final.

## 1.1 Elaboration d'un asservissement visuel des robots à câbles

Cette première section est consacrée à l'élaboration d'une loi de commande classique adaptée aux robots parallèles à câbles. Ceci nous permettra de montrer les améliorations apportées par l'asservissement visuel (seconde section du

chapitre) et servira de support de comparaison pour la loi simplifiée que nous proposerons en troisième section.

### 1.1.1 Construction de la loi de commande classique

Soit un robot parallèle à  $m$  câbles contrôlant  $n$  degrés de liberté. Pour rappel, la pose  $\mathbf{X}$  de la plate-forme est la donnée des paramètres de pose donnant la position de la plate-forme dans l'espace ainsi que son orientation. Afin de commander la pose de la plate-forme, on contrôle les longueurs  $\rho_i$  des câbles. Les câbles sont reliés au bâti en un point  $\mathbf{A}_i$  que nous appelons *sortie de câble* et à l'organe terminal en un point  $\mathbf{B}_i$  que nous appelons *point d'attache*. En l'absence d'élasticité, de modèle de pesance, et en supposant une tension strictement positive, la longueur d'un câble sera égale à  $\|\mathbf{A}_i\mathbf{B}_i\|$ . Si la tension est nulle, sa longueur déroulée sera supérieure à la distance entre son point de sortie et son point d'attache.

Les équations de la cinématique inverse permettent de construire la relation suivante entre les variations de la pose de l'organe terminal  $\dot{\mathbf{X}}$  et les variations des coordonnées articulaires  $\dot{\boldsymbol{\rho}}$  :

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{X}} \quad (1.1)$$

La matrice  $\mathbf{J}^{-1}$  dépend tout autant de la pose de l'effecteur que des longueurs de câbles. Ses lignes sont données par :

$$\mathbf{J}_i^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{A}_i\mathbf{B}_i}{\rho} & \frac{\mathbf{CB}_i \times \mathbf{A}_i\mathbf{B}_i}{\rho} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$\mathbf{C}$  étant un point de la plate-forme préalablement choisi.

Ainsi, un déplacement pratique s'éloigne nécessairement de la trajectoire théorique, la convergence étant assurée par un schéma itératif permettant de corriger la commande cinématique.

Supposons le cas simple d'un robot 3-1 dont nous ne contrôlons que la position. Soit alors  $\Delta\mathbf{X} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  la commande envoyée au manipulateur. Nous avons alors :

$$\Delta\rho_i = \frac{x\Delta x}{\rho} + \frac{y\Delta y}{\rho} + \frac{z\Delta z}{\rho} \quad (1.3)$$

Dès lors, la longueur déroulée  $(\rho_i + \Delta\rho_i)^2$  du câble  $i$  après réalisation de la commande cinématique est égale à :

$$\begin{aligned} (\rho_i + \Delta\rho_i)^2 = & + \frac{x^2 + y^2 + z^2}{\rho^2} \\ & + \frac{2(x\Delta x + y\Delta y + z\Delta z)}{\rho^2} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Or, si le déplacement avait correctement été effectué, nous aurions la relation suivante :

$$(\rho_i + \Delta\rho_i)^2 = (x + \Delta x)^2 + (y + \Delta y)^2 + (z + \Delta z)^2 \quad (1.5)$$

En soustrayant 1.5 à 1.4, nous avons :

$$\rho^2 e(\rho_i) = + \frac{(x^2 - \rho^2)(\Delta x)^2}{2xy\Delta x\Delta y} + \frac{(y^2 - \rho^2)(\Delta y)^2}{2yz\Delta y\Delta z} + \frac{(z^2 - \rho^2)(\Delta z)^2}{2zx\Delta z\Delta x} \quad (1.6)$$

En supposant pour simplifier  $\Delta y = \Delta z = 0$  et  $\Delta x > 0$ , nous avons :

$$|e(\rho_i)| = \frac{y^2 + z^2}{\rho^2} (\Delta x)^2 > 0 \quad (1.7)$$

Cette erreur sera d'autant plus faible ici que la fréquence de la commande sera élevée, permettant des déplacements plus petits et donc une dérive moins importante. On notera également dès 1.6 que l'erreur est moindre lorsque la longueur du câble est plus grande.

### **1.1.2 Utilisation des moments 2D**

#### **1.1.3 Cas du robot N-1**

## **1.2 Amélioration de la robustesse et de la précision**

### **1.2.1 Robustesse aux incertitudes de modèle**

### **1.2.2 Amélioration de la précision**

#### **1.2.3 Illustration des limites avec le cas N-1**

## **1.3 Asservissement simplifié : commande articulaire**

### **1.3.1 Motivations**

### **1.3.2 Le schéma de Broyden**

### **1.3.3 Commande simplifiée**

#### **1.3.4 Cas N-1**

## **1.4 Conclusions**

# Bibliography