

Identifiabilité des dynamiques d'un manipulateur flexible par vision

Edouard LAROCHE, Philippe CELKA

LSIIT, UMR CNRS 7005, Université de Strasbourg, Bd Sébastien Brant, F-67400, Illkirch, France

laroche@lsiit.u-strasbg.fr, philippe.celka@iut-bm.univ-fcomte.fr
http://eavr.u-strasbg.fr

Résumé—*Ce travail propose une méthode permettant d'identifier les dynamiques d'un manipulateur comportant des flexibilités articulaire, s'appuyant sur les mesures de la position des moteurs et de la position de l'organe terminal donnée par une caméra. La méthode envisagée s'appuie sur une formulation linéaire en fonction des paramètres nécessitant le calcul des dérivées seconde à partir de la mesure bruitée des positions. Cette méthode, relativement peu coûteuse en temps de calcul, peut cependant s'avérer délicate à régler et il n'est pas évident d'obtenir des valeurs précises de paramètres. Dans ce travail, nous montrons qu'une précision moyenne inférieure à 1 % peut être obtenue avec un réglage adéquat.*

Mots-clés—*Modélisation, Identification, Identifiabilité, Flexibilités, Modèle Dynamique, Harmonic Drive, Vision.*

I. INTRODUCTION

Depuis quelques années, le LSIIT développe des activités de recherche dans le domaine de la chirurgie laparoscopique robotisée, en collaboration avec l'IRCAD (Institut de Recherche contre le Cancer de l'Appareil Digestif). Dans ce type de chirurgie, une des difficultés réside dans la présence de mouvements physiologiques (respiration et battement cardiaque) qui perturbent tant le chirurgien que la commande du robot. Une approche a été proposée, consistant à commander, grâce à une caméra rapide, les premiers DDL (degrés de liberté) du manipulateur, de manière à déplacer l'instrument de manière synchrone avec l'organe, permettant ainsi au chirurgien d'opérer une scène apparemment statique. Ces approches ont été validées sur un manipulateur prototype disposant de dynamiques élevées [7]. Pour atteindre la bande passante nécessaire, il s'est rapidement avéré nécessaire de connaître les dynamiques et de tenir compte des flexibilités. Puisque le robot opère autour d'une configuration nominale, il est suffisant d'identifier un modèle linéaire et l'approche à temps continu a montré de bonnes performances [4]. Basé sur ce modèle, des correcteurs multivariables ont été synthétisés qui permettent d'atteindre la bande passante nécessaire [3]. Étudiées en simulation, ces approches ont montré que le domaine de stabilité autour de la configuration nominale est réduit [9]. Dans le but de mieux évaluer la robustesse des lois de commande, il apparaît indispensable de disposer d'un modèle du manipulateur permettant de reproduire fidèlement son comportement pour des configurations diverses. Dans cet article, nous présentons une approche permettant d'identifier un tel modèle.

Les techniques d'identification de modèle de manipulateur rigides sont bien établies. Elles reposent le plus souvent sur un modèle linéaire en fonction des paramètres et l'estimation des paramètres correspond à une minimisation de l'erreur sur

l'entrée [8], [6]. Par rapport aux méthodes de minimisation de l'erreur de sortie, elles ont l'avantage d'être plus simples à mettre en œuvre et d'éviter d'avoir recours à la minimisation d'un critère généralement non-convexe, avec tous les problèmes de minima locaux et d'initialisation bien connus. Par contre, elles nécessitent la reconstruction du régresseur, qui contient les vitesses et les accélérations, à partir de mesures bruitées. Ces erreurs sont susceptibles de fausser l'estimation et des filtres doivent être inclus. Dans ce travail, c'est cette première approche qui est retenue, pour des raisons de simplicité.

L'identification des manipulateurs contenant des flexibilités est largement traitée dans la littérature mais bien souvent dans le cas très réduit d'un seul DDL. Pour un nombre de DDL supérieur ou égal à deux, le problème est loin d'être trivial et des mesures supplémentaires sont généralement utilisées.

- Les codeurs de position sont utilisés par Wernholt et Östring [14], [11].
- Un accéléromètre positionné en bout d'organe terminal est utilisé par Yurkovitch et al. en 1990 [16] et par Viksten et al. en 2001 [13].
- Des jauges de contraintes sont utilisées par Carusone et al. pour mesurer les déformations segmentaires d'un manipulateur à 2-DDL [2].
- La vision peut aussi être utilisée. En 2001, Yoshikawa et al. ont utilisé une caméra CCD à 50 Hz, pour mesurer la déformation des bras grâce à des marqueurs visuels situés sur ceux-ci [15]. Cuvillon et al. ont utilisé la vision pour identifier un modèle destiné à synthétiser des lois de commande multivariables [3], [4].

Dans le présent travail, on considère une structure rigide avec des articulations présentant des flexibilités. Une caméra rapide est utilisée pour mesurer la position de l'organe terminal, comme cela se fait en asservissement visuel.

Cet article présente une méthode d'identification d'un modèle de connaissance tenant compte des flexibilités, à partir des informations des codeurs de position et d'une caméra. En présence d'erreurs de mesure, la précision de l'estimation des paramètres dépend largement du réglage de la méthode. Cet article se focalise sur le réglage des filtres destinés à réduire l'influence des bruits de mesure. Il est organisé de la manière suivante : la partie 2 présente le système robotique. La partie 3 détaille la modélisation du bras. La méthode d'identification proposée est présentée dans la partie 4. L'étude de la précision de l'estimation en fonction du réglage fait l'objet de la

partie 5. Une conclusion est présentée en partie 6.

II. PRÉSENTATION DU SYSTÈME

Le robot considéré est présenté sur la figure 1. Ce prototype, développé par la société Sinters, répond à un cahier des charges du laboratoire pour une utilisation sur cœur battant. Il s'agit d'un bras robotique SCARA à 6 DDL, équipé d'actionneurs DC brushless couplés avec des réducteurs de type Harmonic-Drive. Le capteur visuel utilisé est une caméra rapide (DALSA CAD6) permettant d'acquérir 500 images par seconde avec une résolution de 256×256 pixels. Le traitement d'image et l'asservissement sont synchronisés sur l'horloge de la caméra.

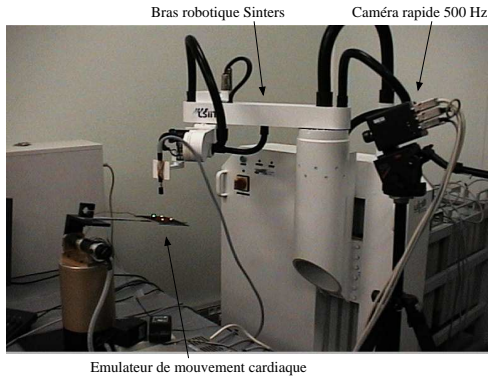


Fig. 1. Robot prototype

Le système d'exploitation temps réel RTAI est utilisé pour assurer une période d'échantillonnage constante. Un ordinateur est dédié à la tâche d'acquisition et de traitement d'image en temps réel. Les consignes de vitesses issues de ces calculs sont transmises aux contrôleurs du robot *via* une liaison série à 10 Mbits/s.

Pour la compensation des mouvements du cœur-battant, des marqueurs à DEL et un laser sont utilisés pour suivre les déplacements du cœur. Un algorithme de commande permet de déterminer les déplacements du cœur par rapport à l'organe terminal et de déterminer les consignes à appliquer aux contrôleurs.

Dans le cadre de l'identification d'un modèle phénoménologique, une DEL est placée en bout de l'organe terminal (cf. figure 2). La caméra permet alors de déterminer les déplacements de cet organe ainsi que les positions articulaires correspondantes.

Afin de simplifier la modélisation du robot, nous nous sommes limités aux DDL introduisant les plus grandes flexibilités. Il s'agit des articulations numéro 2 et 3 (épaule et coude). L'étude sera donc faite sur un modèle de type double pendule plan et l'effet des autres DDL est négligée.

III. MODÈLE PHÉNOMÉNOLOGIQUE

Nous développons dans cette partie la structure du modèle du bras plan à 2 DDL intégrant les flexibilités, les boucles

d'asservissement des vitesses articulaires ainsi que la mesure par vision.

A. Dynamiques de la structure

Le comportement des manipulateurs rigides est donné par l'équation d'Euler-Lagrange appliquée à chaque DDL k :

$$\Gamma_k = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_k} - \frac{\partial L}{\partial \theta_k} \quad k = 1, \dots, n \quad (1)$$

où θ_k est le déplacement (linéaire ou angulaire) correspondant au k ème DDL ; Γ_k est le couple ou la force extérieure appliquée à ce DDL ; L est le Lagrangien du système, égal à la différence de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle.

Dans le cas d'une bras rigide plan horizontal, l'énergie potentielle est nulle et l'énergie cinétique s'écrit $L = \frac{1}{2}(J_a \dot{\theta}_1^2 + J_b(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + J_c \dot{\theta}_1(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2))$, ne faisant intervenir qu'un nombre limité de paramètres de base [5]. Le modèle d'Euler-Lagrange peut alors se mettre sous la forme :

$$\mathcal{M}(\theta) \ddot{\theta} = \mathcal{F}(\Gamma, \theta, \dot{\theta}) \quad (2)$$

avec :

$$\mathcal{M} = \begin{bmatrix} J_a + J_b + J_c \cos(\theta_2) & J_b + \frac{1}{2} J_c \cos(\theta_2) \\ J_b + \frac{1}{2} J_c \cos(\theta_2) & J_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

et

$$\mathcal{F} = \begin{bmatrix} \Gamma_1 + J_c \dot{\theta}_2(\dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_1) \sin(\theta_2) \\ \Gamma_2 - \frac{1}{2} J_c \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ce qui permet d'écrire une représentation d'état et de simuler le modèle.

Pour l'estimation des paramètres, il est intéressant de constater que ce modèle se met aussi sous une forme affine en fonction des paramètres, ce qui est pratique pour l'estimation :

$$\mathcal{A}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

avec

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 & \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 & (\ddot{\theta}_1 + \frac{c_2}{2} \ddot{\theta}_2) - \dot{\theta}_2(\dot{\theta}_1 + \frac{s_2}{2} \dot{\theta}_2) \\ 0 & \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 & \frac{1}{2}(\dot{\theta}_1 c_2 + \dot{\theta}_1^2 s_2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

où $c_2 = \cos(\theta_2)$ et $s_2 = \sin(\theta_2)$. La prise en compte de frottements se fait simplement en retranchant au couple le terme adéquat. Par exemple, on prends en compte des frottements fluides en retranchant $f_{v1} \dot{\theta}_1$ à Γ_1 et $f_{v2} \dot{\theta}_2$ à Γ_2 . L'expression reste linéaire en fonction des paramètres.

B. Dynamiques des réducteurs

Dans la configuration la plus classiquement adoptée et qui est considérée ici, chaque articulation est composée d'un réducteur, d'un moteur et d'un codeur de position placé du côté moteur. Les réducteurs de type Harmonic Drive, retenus pour le manipulateur présenté, sont réputés ne pas présenter de jeu mais introduisent des flexibilités [12], [1]. Des travaux sont disponibles dans la littérature, développant un modèle très fin de ces articulations. Dans notre cas, où le modèle doit être

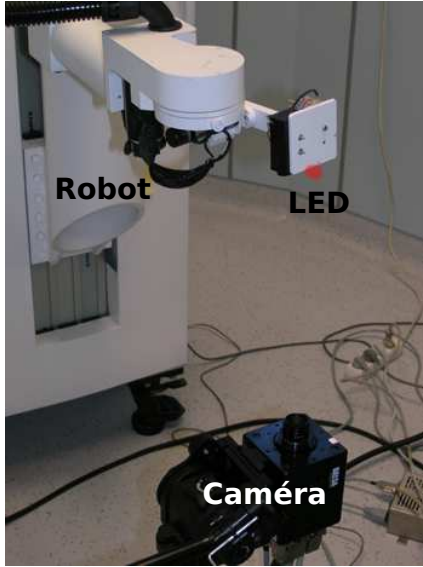


Fig. 2. Robot et caméra

identifié, un modèle simple ne comportant qu'une seule raideur est préférable.

La position de l'articulation étant θ_k , notons q_k la position du moteur. Pour un rapport de transformation N_k , le couple appliqué à l'articulation s'écrit :

$$\Gamma_k = K_k \left(\frac{q_k}{N_k} - \theta_k \right) + f_k \left(\frac{\dot{q}_k}{N_k} - \dot{\theta}_k \right) \quad (7)$$

où K_k est la constante de raideur de l'accouplement et f_k est son coefficient de dissipation. L'équation dynamique du moteur s'écrit alors :

$$J_{mk} \ddot{q}_k = C_k - \frac{\Gamma_k}{N_k} - f_{mk} \dot{q}_k \quad (8)$$

où J_{mk} est l'inertie des parties tournantes liées au moteur, C_k est le couple moteur et f_{mk} est le coefficient de dissipation du moteur.

Il est possible de réduire le nombre de paramètres en ramenant les équations du côté de la charge par un changement de variable : $q_k = N_k \tilde{q}_k$, $\tilde{J}_{mk} = J_{mk} N_k^2$, $\tilde{C}_k = N_k C_k$; ce qui donne les équations suivantes :

$$\Gamma_k = K_k (\tilde{q}_k - \theta_k) + f_k (\dot{\tilde{q}}_k - \dot{\theta}_k) \quad (9)$$

$$\tilde{J}_{mk} \ddot{\tilde{q}}_k = \tilde{C}_k - \Gamma_k - \tilde{f}_{mk} \dot{\tilde{q}}_k \quad (10)$$

comportant 4 paramètres à estimer au lieu de 5 précédemment, chiffre qui peut se ramène à deux dans le cas où on néglige les frottements.

C. Asservissement de vitesse

Un asservissement de la vitesse des moteurs est classiquement réalisé par le variateur et c'est le cas qui est considéré ici. Cette boucle est réglée à l'aide de potentiomètres et il n'est généralement pas aisé de connaître précisément la fonction

de transfert du correcteur. La structure est généralement un PI de la forme :

$$C_{mk} = K_{pk} (q_k^* - q_k) + K_{ik} \int^t (q_k^* - q_k) dt \quad (11)$$

dont il faut estimer les paramètres K_{pk} et K_{ik} . En utilisant le changement de variable introduit précédemment, cette équation s'écrit :

$$\tilde{C}_{mk} = \tilde{K}_{pk} (\tilde{q}_k^* - \tilde{q}_k) + \tilde{K}_{ik} \int^t (\tilde{q}_k^* - \tilde{q}_k) dt \quad (12)$$

où $\tilde{K}_{pk} = K_{pk} N_k^2$ et $\tilde{K}_{ik} = K_{ik} N_k^2$.

D. Mesure par vision

L'originalité du travail consiste à utiliser la vision pour estimer la position articulaire du manipulateur. (Rappelons en effet que la mesure par codeur est faite du côté de l'actionneur). Imaginons que l'organe terminal du robot soit équipé d'un certain nombre de marqueurs lumineux et que la caméra soit fixe dans le repère de base. Un traitement d'image permet d'obtenir le vecteur F contenant les p coordonnées dans l'image des différents marqueurs.

Pour un manipulateur de structure rigide, F est fonction des positions articulaires et peut être donné par un modèle géométrique $F = F(\theta)$. Considérons tout d'abord une position d'équilibre F_e . La gravité étant sans effet, on peut alors considérer que les accouplements flexibles ne subissent pas de déformation ce qui permet de déterminer $\theta_e = \tilde{q}_e$. Autour de cet équilibre, cette relation peut être linéarisée, ce qui donne :

$$F - F_e = J(\theta_e) (\theta - \theta_e) \quad (13)$$

où la matrice d'interaction $J(\theta_e)$ est le Jacobien du modèle géométrique évalué à l'équilibre. Pour des déplacements lents, les positions du moteur et de la charge sont identiques ($\theta_e = \tilde{q}_e$) ce qui permet d'identifier le Jacobien grâce à différents déplacements d'un seul DDL : en déplaçant l'articulation k , on obtient la k ième colonne : $J_{:,k}(\theta_e) = (F - F_e) / (\tilde{q}_k - \tilde{q}_{ek})$.

A partir du Jacobien ainsi estimé, on reconstruit le vecteur des positions du bras :

$$\theta = \theta_e + J^\dagger(\theta_e) (F - F_e) \quad (14)$$

Dans le cas d'un nombre de composantes de F identique au nombre de DDL du manipulateur, la pseudo-inverse est équivalente à une simple inversion. Naturellement, les situations de singularité comme la configuration où le bras est tendu doivent être évitées. Dans le travail présenté ici, une unique LED est utilisée comme marqueur visuel ($p = 2$). Comme on peut le voir sur la figure 2, la caméra est placée sous le manipulateur. Le calcul des coordonnées de la LED est effectué en temps réel par un seuillage suivi d'un calcul de barycentre. Une erreur d'estimation subsiste, due à la précision limitée du capteur visuel ; nous l'avons évaluée à $\pm 100 \mu rad$.

Les mesures de position du codeur (ramenée à la même échelle que la position de l'articulation) et la position de

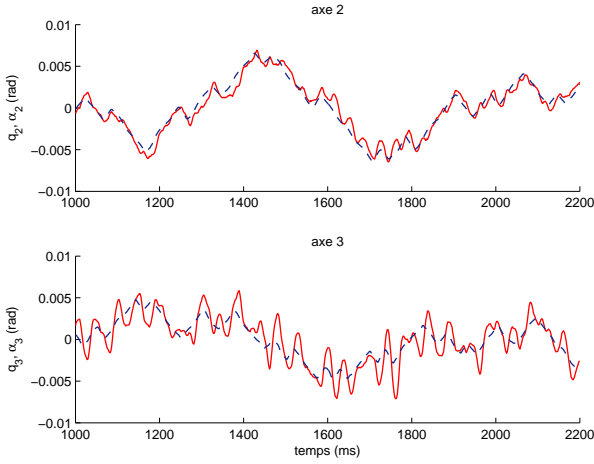


Fig. 3. Positions articulaires coté actionneur (--) et coté charge (—)

l'articulation reconstruite à partir de la vision sont données dans la figure 3 dans le cas d'une excitation de type SBPA sur la vitesse de consigne, pour une configuration proche de $q_2 = 75^\circ$. On observe une sensible différence entre ces deux mesures, effet des flexibilités. Précisons que les autres DDL du robot sont asservies à une position constante et que les dynamiques associées à d'éventuelles déplacements de ces articulations sont négligées.

IV. PROTOCOLE D'ESTIMATION

Dans la suite du travail, on se focalise sur l'étude de l'identifiabilité pratique d'un modèle légèrement simplifié ne tenant pas compte des frottements¹ et où le correcteur ne présente qu'un effet proportionnel. Dans l'esprit d'autres travaux menés sur la machine asynchrone [10], le but est d'évaluer si une estimation relativement précise des paramètres est possible, compte-tenu de la précision limitée des mesures. Le modèle de simulation utilisé s'appuie sur des valeurs a priori des paramètres : $J_a = 0,31 \text{ kg.m}^2$, $J_b = 0,054 \text{ kg.m}^2$, $J_c = 0,095 \text{ kg.m}^2$, $N_1 = N_2 = 20$, $\tilde{K}_1 = 100 \text{ N.m/rad}$, $\tilde{K}_2 = 80 \text{ N.m/rad}$, $\tilde{J}_{m1} = 0,04 \text{ kg.m}^2$, $\tilde{J}_{m2} = 0,024 \text{ kg.m}^2$. Une trajectoire de consigne est conçue, permettant une excursion maximale en position, vitesse et accélération avec une excitation riche. Elle est composée d'une trajectoire en rampe à laquelle est superposée un signal binaire pseudo-aléatoire filtré par un filtre du premier ordre de fréquence 100 Hz. Les trajectoires des vitesses de référence et des vitesses simulées sont données sur la figure 4. La trajectoire de l'extrémité du bras dans le plan est donnée sur la figure 5.

En notant A_{ij} les composantes de la matrice \mathcal{A} (6), le modèle retenu pour l'identification s'écrit :

$$M(t)\Theta = B(t) \quad (16)$$

où $\mathcal{M}(t)$ est donné en (15), $B(t) = [-A_{11} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ et où le

¹Cela s'avère pertinent dans le cas présent où nous nous intéressons surtout aux dynamiques haute fréquence.

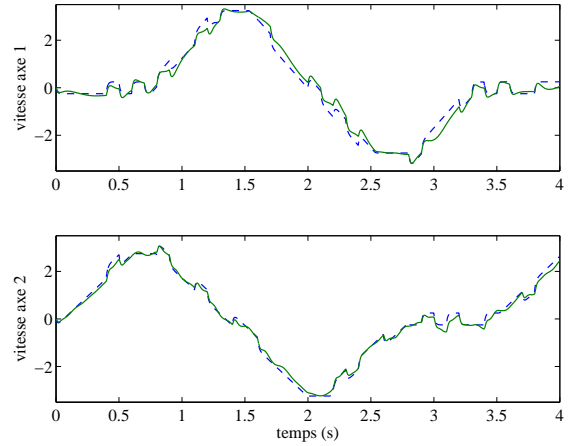


Fig. 4. Vitesses articulaires des moteurs : consigne (--) et mesure (—)

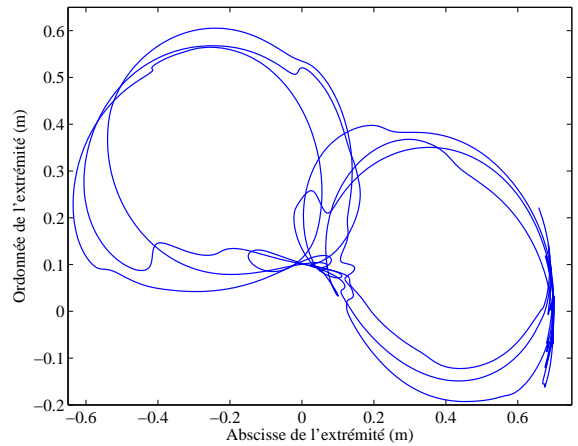


Fig. 5. Trajectoire de l'extrémité du bras dans le plan horizontal

vecteur des paramètres s'écrit :

$$\Theta = \begin{bmatrix} J_b & J_c & \tilde{K}_1 & \tilde{K}_2 & \tilde{J}_{m1} & \tilde{J}_{m2} & \tilde{K}_{p1} & \tilde{K}_{p2} \\ J_a & J_a & J_a & J_a & J_a & J_a & J_a & J_a \end{bmatrix}^T. \quad (17)$$

Remarquons que pour rendre le modèle identifiable, il a fallu se ramener à 8 paramètres, ce qui a été fait en divisant les équations par J_a . A partir de la reconstruction de $\mathcal{M}(t_k)$ et de $B(t_k)$ pour différents instants d'échantillonnage t_k , $k = 1 \dots m$, on construit le système $\mathcal{M}\Theta = \mathcal{B}$ avec :

$$\mathcal{M} = \begin{bmatrix} M(t_1) \\ \vdots \\ M(t_m) \end{bmatrix}, \quad \mathcal{B} = \begin{bmatrix} B(t_1) \\ \vdots \\ B(t_m) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Afin de limiter les effets du bruit de mesures sur l'estimation des paramètres, il est nécessaire de prendre certains soins dans la construction des vitesses et des accélérations présentes dans la matrice \mathcal{M} . Il convient de filtrer à deux étapes.

- Le calcul des accélérations intervenant dans $M(t)$ peut se faire par une dérivée filtrée. Dans le cas d'identification

$$M(t) = \begin{bmatrix} A_{12} & A_{13} & \theta_1 - \tilde{q}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{23} & 0 & \theta_2 - \tilde{q}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{q}_1 & 0 & \ddot{\tilde{q}}_1 & 0 & \dot{\tilde{q}}_1 - \dot{q}_1^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tilde{q}_2 & 0 & \ddot{\tilde{q}}_2 & 0 & \dot{\tilde{q}}_2 - \dot{q}_2^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

hors ligne, il est préférable d'utiliser un filtre aller-retour afin de ne pas introduire de déphasage. Ainsi, une dérivée simple associée à un filtre passe-bas de Butterworth d'ordre et de bande passante appropriés sera utilisé. Nous verrons, dans le paragraphe suivant, l'effet du réglage de ce filtre. Pour le calcul des vitesses, le problème est moins sensible et une dérivée simple est envisageable.

- En filtrant chaque terme de $M(t)$ et de $B(t)$ par un même filtre, on obtient $M_f(t)$ et $B_f(t)$ qui vérifient l'équation $M_f(t)\Theta = B_f(t)$ à partir de laquelle peuvent être estimés les paramètres. On utilisera un filtre de type passe-bande permettant de supprimer des composantes continues, d'atténuer l'effet des bruits en haute fréquence et de mettre en valeur les informations dans la bande de fréquence où il convient d'identifier les dynamiques. Un filtre de Butterworth aller-retour d'ordre et de fréquences de coupure adaptés sera utilisé. On montrera, dans le paragraphe suivant, l'effet du réglage de ses paramètres.

V. RÉGLAGE ET ÉVALUATION

Nous cherchons à évaluer l'effet du réglage des différents filtres sur la précision d'estimation des paramètres. Afin de donner une mesure scalaire de la qualité de l'estimation, nous choisissons comme critère J la moyenne quadratique des erreurs relatives sur chacun des paramètres, exprimée en pourcentage. L'objectif est d'obtenir une valeur inférieure à l'unité. Les erreurs de mesure sont simulées à partir d'une loi normale d'écart-type 10^{-4} rad conformément à ce qui a été observé sur le dispositif expérimental. Les erreurs d'estimation dépendant du tirage des erreurs, trois tirages distincts ont été considérés.

Afin de mettre en évidence l'effet du réglage du filtre d'estimation des accélérations, on a évalué l'effet des variations de la fréquence du filtre passe-bas sur la qualité de l'estimation. Le filtre considéré est un filtre numérique passe-bas de Butterworth d'ordre 4, de fréquence de coupure $z_a \frac{f_e}{2}$ où f_e est la fréquence d'échantillonnage et où z_a est un réel compris entre 0 et 1. Le filtre appliqué à l'équation est quant à lui constant ; il s'agit d'un filtre passe-bande d'ordre 3 de bande passante $\frac{f_e}{2} [0, 01 ; 0, 1]$. Le tracé du critère en fonction de z_a est donné sur la figure 6. On observe que pour $z_a \in [0, 06 ; 0, 08]$, la précision moyenne est inférieure à 1 % pour chacun des trois tirages considérés ; on retiendra donc $z_a = 0, 07$ comme réglage optimal. On remarque que, pour certains tirages, la précision atteinte peut être inférieure à 0,1 % par un choix adéquat de z_a . Cependant, ce choix n'est pas robuste puisque la précision n'est pas reproductible d'un tirage à l'autre. Il convient, en effet, de ne pas régler l'estimation pour un tirage particulier des bruits.

Intéressons nous à présent au réglage du filtre passe-bande appliqué à chacun des termes de l'équation (16). Nous avons

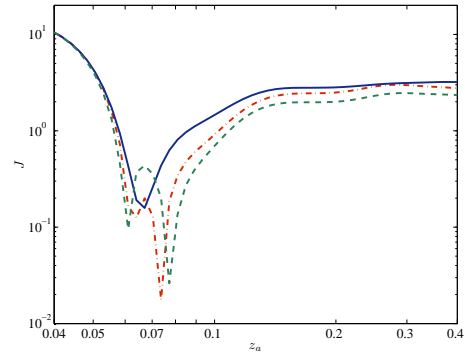


Fig. 6. Effet du réglage du filtre d'estimation des accélérations (3 tirages)

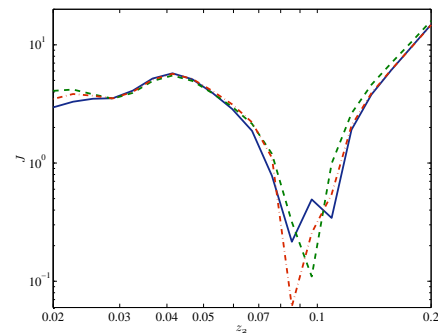


Fig. 7. Effet du choix de la fréquence du filtre d'équation

choisi un filtre de Butterworth d'ordre 3, de bande passante $\frac{f_e}{2} [z_1 ; z_2]$ où z_1 et z_2 sont deux réels vérifiant $0 < z_1 \leq z_2 < 1$. Fixons dans un premier temps à une décade le rapport entre les fréquences haute et basse ($z_2 = 10z_1$) et intéressons nous au choix de la fréquence de coupure z_2 . Les variations du critère sont relevées sur la figure 7. On observe que l'erreur moyenne est inférieure à 1 % pour $z_2 \in [0, 08 ; 1]$; nous choisissons par la suite la fréquence centrale correspondant à 0,09 soit $z_1 z_2 = \frac{0,09^2}{10} = 0,0285^2$. Une fois fixée la fréquence centrale du filtre passe-bande à $0,0285 \frac{f_e}{2}$, intéressons nous à l'effet des variations de son ouverture $\frac{z_2}{z_1}$. Les variations du critère sont représentées sur la figure 8. On observe une erreur inférieure à 1 % pour $\frac{z_2}{z_1} \in [1, 5 ; 5]$. On retiendra $\frac{z_2}{z_1} = 3$, ce qui donne $z_1 = 0,0165$ et $z_2 = 0,0494$.

Afin d'apporter une validation supplémentaire aux résultats obtenus, le modèle dynamique a été simulé, sur une durée de 10 secondes, avec 10 jeux de valeurs estimées des paramètres obtenus en présence de bruit avec le réglage proposé des filtres. La valeur de J_a étant fixée arbitrairement, les autres paramètres sont calculés à partir des valeurs estimées de Θ (17). Les trajectoires obtenues ne se distinguent pas des

paramètre	$\frac{J_b}{J_a}$	$\frac{J_c}{J_a}$	$\frac{\tilde{K}_1}{J_a}$	$\frac{\tilde{K}_2}{J_a}$	$\frac{\tilde{J}_{m1}}{J_a}$	$\frac{\tilde{J}_{m2}}{J_a}$	$\frac{\tilde{K}_{p1}}{J_a}$	$\frac{\tilde{K}_{p2}}{J_a}$
bais	-0,11	-0,31	-0,15	-0,31	0,52	0,22	-0,76	-0,25
écart-type	0,34	0,51	0,15	0,33	0,66	0,54	0,28	0,34
pire cas	-1,42	-0,42	-0,53	-1,40	0,91	-1,02	-1,39	-1,38

TABLE I

ANALYSE DES ERREURS D'ESTIMATION DES PARAMÈTRES À PARTIR DE 800 TIRAGES (EN % DES VALEURS DES PARAMÈTRES)

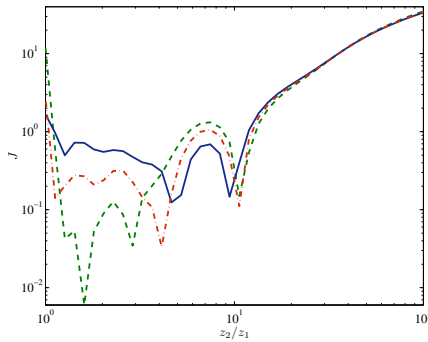


Fig. 8. Effet du choix de l'ouverture du filtre d'équation

trajectoires initiales à moins d'un grossissement et n'ont donc pas été reproduites dans cet article. Les déviations sur les différentes positions q_k et θ_k sont inférieures à 3 mrad et celles sur les vitesses articulaires sont inférieures à 7 mrad/s, ce qui est tout à fait satisfaisant. Précisons que l'utilisation d'une valeur arbitraire de J_a ne modifie pas le comportement du modèle dynamique.

En présence de bruit stochastique, l'estimée des paramètres est une variable aléatoire. En reproduisant l'estimation pour un nombre élevé de tirages du bruit, on peut en estimer le biais et l'écart-type. Ces grandeurs ont été évaluées à partir de 800 tirages et sont présentées dans le table IV en pourcentage des valeurs nominales des paramètres. Ces informations donnent une idée de la précision relative des différents paramètres. On constate ici que les précisions sont régulières, les biais et écart-types étant inférieurs à 0,6 % de la valeur nominale pour chaque paramètres. Le pire cas est également présenté dans ce tableau, correspondant à une erreur moyenne de 0,83 %.

VI. CONCLUSION

Avant de se lancer dans l'utilisation de données expérimentales pour l'estimation des paramètres, il importe de valider que, compte-tenu des erreurs de mesure, la méthode retenue pourra aboutir à une estimation d'une qualité acceptable. Cette phase initiale d'analyse permet également de régler les paramètres de la méthode et de choisir l'excitation appropriée.

Dans ce travail, nous cherchons à identifier le modèle dynamique d'un bras à deux DDL avec des flexibilités articulaires, en s'appuyant sur les mesures des codeurs et des déplacements dans l'image. La méthode proposée, qui s'appuie sur une formulation linéaire en fonction des paramètres, a été

évaluée en simulation. Un réglage de la méthode a été trouvé, permettant d'atteindre une précision relative moyenne inférieure à 1 %, ce qui est tout à fait satisfaisant compte tenu des erreurs de mesure.

REMERCIEMENTS

Loïc Cuvillon, doctorant au LSIT, a apporté une aide précieuse lors des expérimentations.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Albu-Schäffer. *Regelung von Robotern mit elastischen Gelenken am Beispiel der DLR-Leichtbauarme*. PhD thesis, Technischen Universität München, 2001.
- [2] S. Carusone, A. Tzes, I. Lee, and K. Hillsley. Experiment in end-effector tracking control for structurally flexible space manipulator. In *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, volume 9, pages 553–560, 1993.
- [3] L. Cuvillon, E. Laroche, J. Gangloff, and M. de Mathelin. GPC versus H_∞ control for fast visual servoing of a medical manipulator including flexibilities. In *Int. Conf. on Robotics and Automation*, Barcelone-Espagne, 2005.
- [4] L. Cuvillon, E. Laroche, H. Garnier, J. Gangloff, and M. de Mathelin. Continuous-time model identification of robot flexibilities for fast visual servoing. In *IFAC Symposium on System Identification*, Newcastle-Australie, 2006.
- [5] M. Gautier and W. Khalil. Direct calculation of minimum inertial parameters of serial robots. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 6(3) :368–373, 1990.
- [6] M. Gautier and P. Poignet. Identification non linéaire continue en boucle fermée des paramètres physiques de systèmes mécaniques par modèle inverse et moindre carrés d'erreur d'entrée. In *Journées Identification et Modélisation Expérimentale*, Nancy-France, 2001.
- [7] R. Ginhoux, J. Gangloff, M. de Mathelin, L. Soler, M. Arenas Sanchez, and J. Marescaux. Active filtering of physiological motion in robotized surgery using predictive control. *IEEE Trans. on Robotics*, 21(1) :67–79, 2005.
- [8] W. Khalil and E. Dombre. *Modélisation, identification et commande des robots*. Hermes, 1999.
- [9] E. Laroche, L. Cuvillon, J. Gangloff, and M. de Mathelin. Accounting for flexibilities in visual servoing. In *IFAC Symposium on Robust Control Design (ROCOND)*, Toulouse-France, juillet 2006.
- [10] E. Laroche, C. Durieu, and J. P. Louis. Erreurs d'estimation des paramètres de la machine asynchrone. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 36(3) :481–496, 2002.
- [11] M. Östring, S. Gunnarsson, and M. Norrlöf. Closed-loop identification of an industrial robot containing flexibilities. *Control Engineering Practice*, 11(3) :291–300, 2003.
- [12] H.D. Taghirad. *On the Modeling and Identification of Harmonic Drive Systems*. PhD thesis, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 1997.
- [13] F. Viksten. On the use of an accelerometer for identification of a flexible manipulator. Master's thesis, Université de Linköping, Suède, 2001.
- [14] E. Wernholt. *On multivariable and Nonlinear Identification of Industrial Robot*. PhD thesis, Linköping University, Suède, 2004.
- [15] T. Yoshikawa, A. Ohta, and K. Kanaoka. state estimation and parameter identification of flexible manipulators based on visual sensor and virtual joint model. In *Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2840–2845, 2001.
- [16] S. Yurkovitch, A. Tzes, I. Lee, and K. Hillsley. Control and system identification of a two-link flexible manipulator. In *Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 1626–1631, 1990.