

Modélisation, Identification d'une Interface Médicale

Alexandre JANOT ^(1,2), Catherine BIDARD ⁽¹⁾, Maxime GAUTIER ⁽²⁾, Delphine KELLER ⁽¹⁾, Yann PERROT ⁽¹⁾

⁽¹⁾ CEA Fontenay aux Roses
18, route du Panorama BP N° 6 92265 Fontenay aux Roses Cedex, Hauts de Seine

⁽²⁾ Institut de Recherche en Communication et en Cybernétique de Nantes
1, rue de la Noë - BP 92 101 - 44321 Nantes CEDEX 03

[alexandre.janot@{cea.fr;ircsyn.ec-nantes.fr}](mailto:alexandre.janot@cea.fr;ircsyn.ec-nantes.fr) , catherine.bidard@cea.fr , maxime.gautier@ircsyn.ec-nantes.fr

Résumé : *Une interface haptique est un système visant l'immersion sensorielle d'un opérateur dans un monde réel ou virtuel. Généralement, l'interface introduit une distorsion entre l'opérateur et le monde exploré : il convient de l'identifier. Ce papier présente les résultats expérimentaux d'identification obtenus sur une interface médicale développée au CEA. La méthode d'identification se base sur le modèle inverse d'un système et l'estimation au sens des moindres carrés.*

Mots clés : *Modèle inverse, Moindres carrés, Identification paramétrique*

I. INTRODUCTION

Une interface haptique est un dispositif de réalité virtuelle qui relie un opérateur humain à un monde simulé (ou à un monde réel dans ce cas exploré par un dispositif esclave). L'interface haptique vise une immersion sensorielle par la mise en correspondance entre les mouvements et les forces ressentis et réalisés par l'opérateur et ceux appliqués au monde virtuel. De tels systèmes sont de plus en plus demandés pour différentes applications : rééducations médicales, entraînements aux gestes pour la chirurgies, simulateurs d'avions pour l'entraînement des pilotes, interventions en milieux hostiles... L'opérateur interagit avec le milieu exploré en manipulant l'interface depuis l'organe effecteur, comme le montre Figure 1. Il apparaît donc que l'interface haptique idéale est celle possédant une transparence parfaite. L'opérateur ne ressentira pas sa présence et se sentira totalement immergé dans le monde exploré.



Figure 1 : Opérateur interagissant avec un monde virtuel via une interface haptique

Cependant, une interface réelle se présente sous la forme d'une structure mécanique actionnée, introduisant une distorsion entre l'opérateur et le monde exploré. Généralement, la distorsion est créée par les frottements, l'inertie apparente et la compliance de l'interface. L'identification paramétrique d'un modèle physique permet de valider ou rejeter un modèle mathématique et d'en améliorer la conception.

Le système {interface + opérateur} est souvent modélisé par un deuxième ordre (masse, ressort, amortisseur) additionné d'un terme de frottement sec, [1], [3], [5], ou par une succession de systèmes de deuxième ordre [2], [14]. Différents travaux d'identification ont été menés pour différentes interfaces haptiques : dans [6], les auteurs utilisent une analyse spectrale, dans [14] des séries impulsionnelles sont utilisées tandis que dans [18] les auteurs identifient une interface parallèle via un modèle inverse. Dans tous les cas, la distorsion introduite par l'interface est connue localement, i.e., pour une configuration donnée. Nous ne connaissons pas son évolution en fonction de la configuration de l'interface.

Ainsi, sachant qu'une interface haptique se présente sous la forme d'une structure mécanique polyarticulée, il est intéressant d'utiliser les méthodes d'identification par modèle inverse et moindres carrés fréquemment employées dans la robotique industrielle [7] et [9]. Cette méthode présente l'avantage d'être universelle et répétable. En effet, elle a été utilisée avec succès pour l'identification des paramètres dynamiques d'une voiture [24] et d'un modèle de compacteur [19]. Dans [17], les auteurs ont identifié, à l'aide de cette méthode, les paramètres électriques et mécaniques d'une interface haptique à transmission à câble possédant un degré de liberté. Le papier présenté s'inscrit dans cette continuité. En effet, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus lors de l'identification d'une branche 3ddl d'une interface médicale développée au CEA. La première partie présente le modèle dynamique inverse d'un robot quelconque. Dans la deuxième partie, nous présentons la méthode d'identification utilisée. Le modèle d'une branche 3ddl de l'interface médicale est établi dans la troisième partie, la quatrième partie présentant les résultats obtenus. Enfin, dans une cinquième et dernière partie, on présente une manière d'exploiter les résultats obtenus et l'intérêt de la démarche présentée.

II. MODELE DYNAMIQUE INVERSE

Le modèle dynamique inverse d'un robot à n degrés de liberté s'écrit sous la forme suivante [15] :

$$\Gamma = \mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{Q}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}_v\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_s\text{sign}(\dot{\mathbf{q}}) + \text{offset} \quad (1)$$

Où \mathbf{q} est le vecteur ($nx1$) des positions articulaires, $\dot{\mathbf{q}}$ et $\ddot{\mathbf{q}}$ ses dérivées temporelles, Γ le vecteur ($nx1$) des couples articulaires, $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ la matrice d'inertie (nxn) symétrique, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ la matrice (nxn) des forces centrifuges et de Coriolis, $\mathbf{Q}(\mathbf{q})$ le vecteur ($nx1$) de gravité, \mathbf{F}_v et \mathbf{F}_s sont respectivement la matrice (nxn) des coefficients des frottements visqueux et des frottements secs et **offset** le vecteur ($nx1$) des offsets de couples.

Le modèle dynamique inverse est linéaire par rapport aux paramètres inertiels du robot. On obtient une relation de la forme :

$$\mathbf{Y}(\Gamma) = \mathbf{W}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\chi \quad (2)$$

\mathbf{Y} est la matrice colonne de l'image du couple, via la mesure du courant injecté aux moteurs, de dimension ($rx1$), avec $r=nxn_c$ où n_c est le nombre d'échantillons récupérés, \mathbf{W} la matrice du régresseur linéaire de dimension (rxn), χ le vecteur colonne des paramètres inertiels à estimer de dimension (cn). Il est intéressant de noter que la matrice \mathbf{W} est de forme triangulaire supérieure. En effet, le couple moteur d'un corps j ne dépend que des paramètres inertiels de ses successeurs (corps $j+1$ à n). On peut donc écrire que :

$$\begin{pmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \\ \vdots \\ \Gamma_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_{1,1} & \mathbf{W}_{1,2} & \cdots & \mathbf{W}_{1,n} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W}_{2,2} & \cdots & \mathbf{W}_{2,n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{W}_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ \vdots \\ \chi_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

Ainsi, on peut identifier séquentiellement les paramètres inertiels du robot : on identifie les paramètres du corps n , on les reporte, puis on identifie les paramètres du corps $n-1$ et ainsi de suite.

III. METHODE D'IDENTIFICATION

III.1. Détermination des paramètres inertiels minimaux

Une étape essentielle pour l'identification est de rechercher les paramètres inertiels minimaux (appelés aussi paramètres de base). En effet, certains paramètres inertiels se combinent dans l'expression du modèle dynamique inverse, seule leur combinaison ou regroupement peut alors être identifié. Cette recherche se ramène à calculer le rang de \mathbf{W} et à détecter les combinaisons linéaires entre ses colonnes.

Il existe principalement deux manières de calculer les paramètres inertiels minimaux : une méthode littérale basée sur le calcul des énergies [7] et une méthode numérique basée sur le développement QR [10]. Nous allons les présenter.

III.1.1. Méthode littérale

La méthode littérale présentée est valable pour les robots à structures séries ou arborescentes. Comme nous connaissons les expressions des énergies cinétiques et potentielles en fonction des paramètres inertiels, nous devons déterminer les paramètres n'ayant pas d'effet. Sachant que les énergies sont linéaires par rapport aux paramètres inertiels, nous pouvons écrire que :

$$H_j = E_j + U_j = \mathbf{h}_j \mathbf{K}_j = (\mathbf{e}_j + \mathbf{u}_j) \mathbf{K}_j \quad (4)$$

où : \mathbf{K}_j exprime les paramètres standard du corps j , \mathbf{h}_j les fonctions d'énergie correspondant aux paramètres inertiels du corps j , \mathbf{e}_j les fonctions d'énergie cinétique correspondant aux paramètres inertiels du corps j et \mathbf{u}_j les fonctions d'énergie potentielle correspondant aux paramètres inertiels du corps j . \mathbf{h}_j , \mathbf{e}_j , et \mathbf{u}_j sont des matrices ligne (1×10). On peut écrire la relation générale de récurrence entre les fonctions d'énergie des corps j et $j-1$:

$$\mathbf{h}_j = \mathbf{h}_{j-1} {}^{j-1}\lambda_j + \dot{q}_j \eta_j \quad (5)$$

${}^{j-1}\lambda_j$ étant une matrice (10×10) fonction des paramètres géométriques du repère j . Son expression littérale est donnée dans [7]. Elle permet d'exprimer les paramètres inertiels du corps j dans le repère $j-1$ selon la relation :

$${}^{j-1}\mathbf{K}_j = {}^{j-1}\lambda_j {}^j\mathbf{K}_j \quad (6)$$

En termes de fonctions d'énergie nous avons $\mathbf{h}_j =$ constante alors \mathbf{K}_j n'affecte pas le modèle. On note alors que $\mathbf{K}_j = 0$. La condition de regroupement dans [20] est équivalente à la recherche des combinaisons linéaires entre les fonctions d'énergie des paramètres inertiels de la forme :

$$\mathbf{h}_j = \sum_{b=1}^r \mathbf{t}_{jb} \mathbf{h}_{jb} \quad (7)$$

Dans [7] sont donnés deux théorèmes de regroupement suivant que l'articulation soit rotoïde ou prismatique :

Théorème 1 : lorsque l'articulation j est rotoïde, les paramètres Y_{Y_j} , MZ_j et M_j peuvent être regroupés avec les paramètres des corps C_j et C_{j-1} .

Théorème 2 : lorsque l'articulation j est prismatique, les paramètres de la matrice d'inertie du corps j se regroupent avec ceux du corps $j-1$.

III.1.2. Méthode numérique

La décomposition QR de la matrice régresseur \mathbf{W} permet de détecter les dépendances linéaires entre ses colonnes et de sélectionner un ensemble de colonnes indépendantes auquel nous pouvons associer un jeu de paramètre minimal. La décomposition QR de la matrice \mathbf{W} permet d'écrire :

$$\mathbf{Q}^T \mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ 0_{(r-c) \times c} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Avec \mathbf{Q} qui est une matrice orthogonale de dimension (rxr) et \mathbf{R} une matrice triangulaire supérieure de dimension (cxc) . Le rang de la matrice \mathbf{W} est égal au nombre des paramètres inertiels minimaux b :

$$\text{rang}(\mathbf{W}) = b \quad (9)$$

Ce rang se détermine par le nombre d'éléments sur la diagonale R_{ii} non nuls de la matrice \mathbf{R} . En pratique, on définit un seuil de tolérance et on considère les différents R_{ii} nuls s'ils vérifient la relation $|R_{ii}| \leq \text{tol}$.

Les b éléments R_{ii} de la diagonale de \mathbf{R} tels que $|R_{ii}| > \text{tol}$ fournissent les indices des paramètres inertiels de base $\mathbf{K1}$, les colonnes indépendantes correspondantes de \mathbf{W} étant notées $\mathbf{W1}$. Les autres fournissent les paramètres à regrouper $\mathbf{K2}$ et les colonnes dépendantes $\mathbf{W2}$. On écrit ainsi que :

$$\mathbf{WK} = [\mathbf{W1} \ \mathbf{W2}] \begin{bmatrix} \mathbf{K1} \\ \mathbf{K2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Les paramètres de base $\mathbf{K_B}$ s'expriment de la manière suivante, comme combinaison linéaire des paramètres initiaux du modèle :

$$\mathbf{K_B} = \mathbf{K1} + \beta \mathbf{K2} \quad (11)$$

Où la matrice β exprime les relations linéaires entre les colonnes de \mathbf{W} : $\mathbf{W2} = \mathbf{W1}\beta$. En effet, on peut écrire que :

$$\mathbf{WK} = [\mathbf{W1} \ \mathbf{W2}] \begin{bmatrix} \mathbf{K_B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{W1K_B} \quad (12)$$

Ensuite, les relations de regroupements sont calculées à partir de celles exprimant $\mathbf{W2}$ en fonction de $\mathbf{W1}$. La décomposition QR de la matrice $[\mathbf{W1} \ \mathbf{W2}]$ s'écrit :

$$[\mathbf{W1} \ \mathbf{W2}] = [\mathbf{Q1} \ \mathbf{Q2}] \begin{bmatrix} \mathbf{R1} & \mathbf{R2} \\ \mathbf{0}_{(r-b) \times b} & \mathbf{0}_{(r-b) \times (c-b)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Où $\mathbf{R1}$ est une matrice triangulaire supérieure régulière de dimension $(b \times b)$ et $\mathbf{R2}$ est une matrice de dimension $b \times (c-b)$. On obtient finalement $\mathbf{Q1} = \mathbf{W1R1}^{-1}$ et $\mathbf{W2} = \mathbf{W1R1}^{-1}\mathbf{R2}$.

Ce résultat fournit les $(c-b)$ relations linéaires entre les colonnes de $\mathbf{W2}$ et $\mathbf{W1}$. On obtient ainsi la relation de regroupement des paramètres $\mathbf{K2}$ sur les paramètres $\mathbf{K1}$ à partir de laquelle on établit le vecteur des paramètres inertiels de base $\mathbf{K_B}$:

$$\mathbf{K_B} = \mathbf{K1} + \mathbf{R1}^{-1}\mathbf{R2K2} \quad (14)$$

III.1.3. Conclusion

Ainsi, on obtient l'équation suivante :

$$\mathbf{Y}(\Gamma) = \mathbf{W}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \chi_e \quad (15)$$

Où χ_e est le vecteur des paramètres de base à identifier. Donc, pour un système à n degrés de liberté, en admettant que nous avons b paramètres à identifier, nous aurons un

vecteur de mesures de dimension r et $\mathbf{W}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ une matrice de rang plein, b , et de dimension (rxb) avec $r \gg b$. Les deux méthodes présentées permettent de calculer les paramètres de base, i.e. ceux que l'on peut identifier. Les deux méthodes présentent chacune leurs avantages et leurs inconvénients.

La méthode littérale nous permet de calculer les formules de regroupement de manière explicite. Ceci peut se faire à l'aide du logiciel SYMORO+ [4]. Elle est principalement efficace pour les robots comportant une structure série ou arborescente.

Cependant, pour les robots comportant une boucle fermée, on montre que les paramètres minimaux sont ceux de la structure arborescente équivalente [8], mais les relations de fermeture permettent, en général, des regroupements supplémentaires. La décomposition QR est donc intéressante dans ce cas de figure. Elle est également utile pour supprimer des paramètres dans un modèle minimal dans le cas de trajectoires ne sensibilisant qu'une partie des paramètres.

III.2. Trajectoires excitantes [11]

Après avoir calculé les $\mathbf{K_B}$ paramètres de base, nous devons choisir des trajectoires qui excitent au mieux les paramètres. Une trajectoire suffisamment excitante se traduira par un bon conditionnement de \mathbf{W} . Ainsi, le calcul de trajectoires excitantes peut s'effectuer à l'aide d'une programmation d'optimisation non linéaire dont le critère à minimiser est

$\text{cond}(\mathbf{W})$ avec $\text{cond}(\mathbf{W}) = \sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}}$ où σ_{\max} et σ_{\min} sont

respectivement les valeurs singulières maximale et minimale de la matrice \mathbf{W} .

Il est également possible de construire des trajectoires pour identifier spécifiquement certains paramètres. Par exemple, pour identifier le couple de frottement, on peut utiliser des paliers de vitesse croissants, pour identifier les termes de gravité, on peut utiliser des allers retours à faible vitesse [21] et pour les inerties on peut choisir des trajectoires sinusoïdales ou d'autres types de trajectoires selon les capacités de la machine. L'utilisation de trajectoires spécifiques permet de simplifier les trajectoires excitantes ainsi que l'interprétation des résultats.

III.3. Calcul de la solution optimale

Le système est donné par la relation générale suivante :

$$\mathbf{Y}(\Gamma) = \mathbf{W}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \chi + \rho \quad (17)$$

ρ est un vecteur colonne de résidu de dimension $(rx1)$.

La théorie de l'estimation offre une gamme assez large de méthodes. L'utilisation de méthodes classiques pour la résolution de systèmes surdéterminés donne de bons résultats, à condition de traiter les éléments de \mathbf{W} de façon appropriée. Ce point sera détaillé au prochain paragraphe.

On définit la solution $\hat{\chi}$ de (17) au sens des moindres carrés

par : $\hat{\chi} = \min_{\hat{\chi}} \|\rho\|_2$

Comme nous considérons les \mathbf{K}_B paramètres de base ainsi que des trajectoires excitantes, \mathbf{W} est de rang maximum. Nous avons alors une solution explicite et unique de $\hat{\chi}$:

$$\hat{\chi} = \left((\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \right) \mathbf{Y} = \mathbf{W}^+ \mathbf{Y} \quad (18)$$

Pratiquement, on calcule une estimation de l'écart type sur les valeurs identifiées en considérant que \mathbf{W} est déterministe et que \mathbf{p} est un vecteur aléatoire centré, de composantes indépendantes, d'écart type σ_p et de matrice de covariance

$$\mathbf{C}_p \text{ telle que : } \mathbf{C}_p = E(\mathbf{p}\mathbf{p}^T) = \sigma_p^2 \mathbf{I}_r$$

\mathbf{I}_r étant la matrice d'unité de dimension r . En supposant que le vecteur des erreurs est centré, de composantes indépendantes et d'égaux dispersions, l'écart type σ_p peut être calculé par l'estimateur non biaisé suivant :

$$\sigma_p^2 = \frac{\|\mathbf{Y} - \mathbf{W}\hat{\chi}\|^2}{(r - b)} \quad (19)$$

La matrice de covariance de l'erreur d'estimation a alors pour expression :

$$\mathbf{C}_{\hat{\chi}} = \sigma_p^2 (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \quad (20)$$

On en déduit l'écart type : $\sigma_{\hat{\chi}_j} = \sqrt{\mathbf{C}_{\hat{\chi}}(j, j)}$

Cette interprétation a été utilisée dans [22] mais doit être considérée avec prudence car, dans notre cas, les hypothèses ne sont pas satisfaites, \mathbf{W} n'étant pas déterministe. En effet, les mesures sont bruitées et le modèle proposé n'est pas parfait, ce qui nécessite un traitement préalable. L'écart type relatif est estimé par :

$$\sigma_{\hat{\chi}_{jr}} \% = 100 \frac{\sigma_{\hat{\chi}_j}}{|\chi_j|} \quad (21)$$

On peut utiliser ce critère afin de juger la qualité de l'identification.

III.4. Traitement des données

Pour que l'estimation des paramètres soit correcte, il faut traiter les signaux de manière appropriée. Pour éliminer les mesures aberrantes (couple et position), nous utilisons un filtre médian à l'aide de la fonction « *medfilt1* » de MATLAB. Pour l'identification des paramètres dynamiques, nous effectuons un traitement hors-ligne. Les calculs de la vitesse et de l'accélération se font à l'aide de la différence centrée afin d'éviter tout phénomène de distorsion en phase et en amplitude. La différence centrée est régie par l'équation suivante, T_e étant la période d'échantillonnage :

$$\dot{q}_k = \frac{q_{k+1} - q_{k-1}}{2T_e} \quad (22)$$

Le filtrage de la position se fait à l'aide d'un filtrage aller et retour avec un filtre Butterworth d'ordre quatre dont la fréquence de coupure est de 20 Hz environ. Cela se fait avec

les fonctions « *butter* » et « *filtfilt* » de MATLAB. Nous filtrons le vecteur \mathbf{Y} et les colonnes de la matrice \mathbf{W} avec la fonction « *decimate* » de MATLAB. Cette dernière utilise le filtrage aller et retour à l'aide d'un filtre de Chebyshev dont nous fixons la fréquence de coupure. La règle générale stipule que la fréquence de coupure soit cinq à dix fois supérieure à celle de la dynamique du système que l'on peut obtenir par analyse spectrale. De plus, cette fonction récupère un échantillon sur n . Ce choix est motivé par le fait qu'il n'y a pas d'informations contenues dans la bande $[f_c, f_{ech}/2]$. Par suite, on effectue un sous échantillonnage [9], [21]. Si ce dernier n'est pas effectué, les hypothèses sur \mathbf{p} ne sont plus valables. En effet, on laisse des échantillons qui ne contiennent pas d'information. Par suite, r est trop grand et l'estimateur est biaisé. On surestime la confiance de l'estimation.

IV. INTERFACE MEDICALE

Cette partie présente l'interface médicale à identifier. Nous donnerons les paramètres géométriques par la convention Denavit Hartenberg modifiée [16] ainsi que le modèle dynamique pour l'identification des paramètres inertiels.

IV.1. Présentation de l'interface

L'interface médicale [12] à identifier est présentée Figure 2. C'est une structure fermée 6ddl. Chaque branche est composée d'une embase pivotante, d'un bras et d'un avant bras, les deux branches étant connectées grâce à un poignet. On se propose d'identifier la branche supérieure en enlevant la poignée.



Figure 2 : Interface médicale à identifier

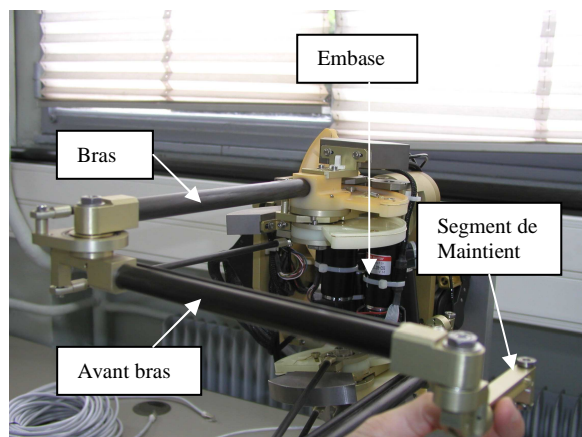


Figure 3 : Branche 3ddl de l'interface médicale

L'embase et le bras sont actionnés directement à l'aide d'un réducteur à cabestan. L'avant bras est actionné à l'aide d'une structure parallélogramme. Enfin, le segment de maintien de la poignet garde une direction constante par rapport à l'embase grâce à une structure double parallélogramme. Figure 3 illustre une branche 3ddl. Nous allons présenter la modélisation de l'interface par la convention DHM appliquée aux robots à structures fermées.

IV.2. Modélisation de l'interface

Figure 4 présente le paramétrage choisi. Volontairement, nous n'avons pas modélisé le double parallélogramme de maintien. Ce point sera justifié ultérieurement lors du calcul des paramètres inertiels minimaux.

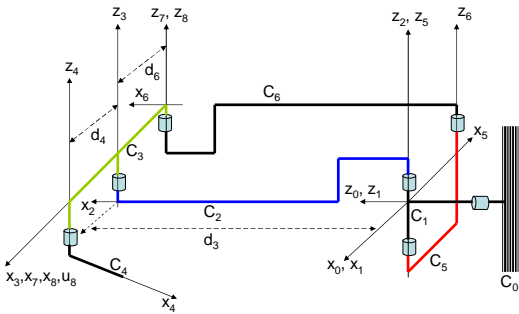


Figure 4 : Repères DHM pour modéliser une branche 3ddl

Le corps 1 est l'embase, le corps 2 le bras, le corps 3 l'avant bras et le corps 4 le segment de maintien de la poignée qui garde un angle constant par rapport à l'embase. Les corps 5 et 6 permettent l'actionnement de l'avant-bras. Tableau 1 présente les paramètres DHM :

j	a(j)	μ_j	σ_j	γ_j	b_j	α_j	d_j	θ_j	r_j
1	0	1	0	0	0	0	0	q_1	0
2	1	1	0	0	0	-90	0	q_2	0
3	2	0	0	0	0	0	d_3	q_3	0
4	3	0	0	0	0	0	d_4	q_4	0
5	1	1	0	0	0	-90	0	q_5	0
6	5	0	0	0	0	0	d_6	q_6	0
7	6	0	0	0	0	0	d_3	q_7	0
8	3	0	2	0	0	0	$-d_6$	0	0

Tableau 1 : Paramètres géométriques d'une branche 3ddl

Pour calculer le Modèle Dynamique Inverse (MDI) de l'interface, nous coupons à l'articulation 7 pour obtenir une structure arborescente équivalente. A l'aide du logiciel SYMORO+, nous calculons le MDI de la structure arborescente équivalente. Dans ce qui suit, on note :

$\mathbf{q}_a = [q_1 \ q_2 \ q_5]^T$, le vecteur des variables articulaires actives, $\mathbf{q}_p = [q_3 \ q_6 \ q_4]^T$, le vecteur des variables articulaires passives, $\mathbf{q}_c = [q_7]^T$, le vecteur des variables articulaires coupées, $\mathbf{q}_{ar} = \left[\begin{matrix} [\mathbf{q}_a]^T & [\mathbf{q}_p]^T \end{matrix} \right]^T$, le vecteur des

variables articulaires de la structure arborescente équivalente, $\Gamma_{ar} = [\Gamma_{ar1} \ \Gamma_{ar2} \ \Gamma_{ar5} \ \Gamma_{ar3} \ \Gamma_{ar6} \ \Gamma_{ar4}]^T$, le vecteur des couples articulaires de la structure arborescente équivalente, avec : $\Gamma_{am} = [\Gamma_{ar1} \ \Gamma_{ar2} \ \Gamma_{ar5}]^T$, le vecteur des couples articulaires motorisés, $\Gamma_{ap} = [\Gamma_{ar3} \ \Gamma_{ar6} \ \Gamma_{ar4}]^T$ le vecteur des couples articulaires passifs et on note $\Gamma = \left[\begin{matrix} [\Gamma_{am}]^T & [\Gamma_{ap}]^T \end{matrix} \right]^T$.

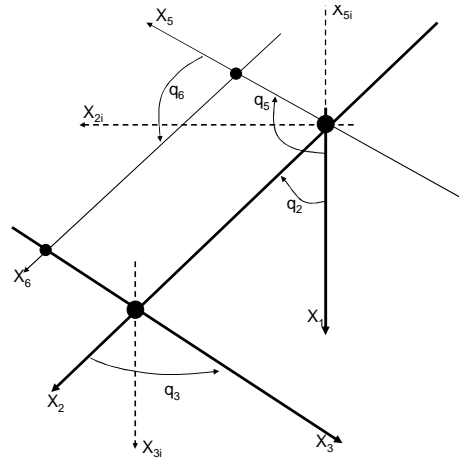


Figure 5 : parallélogramme actionnant l'avant bras

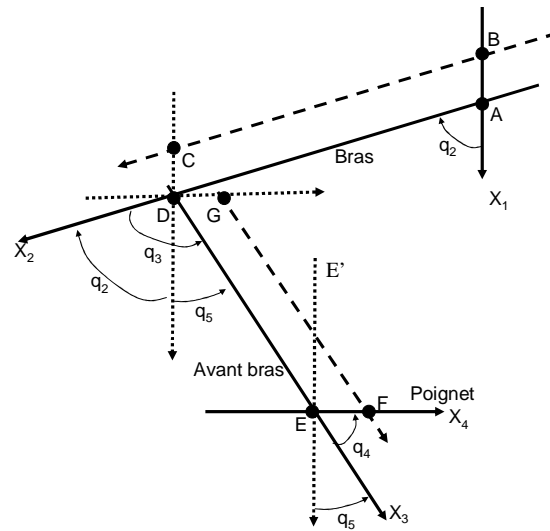


Figure 6 : Structure double parallélogramme pour le segment de maintien de la poignée

Le parallélogramme illustré Figure 5 impose des relations de contraintes qui permettent de calculer les variables passives en fonctions des variables actives. Ces boucles présentent certaines particularités qui nous permettent de dégager de simples relations de contraintes. Les corps 5 et 3, ainsi que les corps 2 et 6 sont toujours parallèles. Ce qui implique que :

$$q_3 = q_5 - q_2 \quad (23)$$

$$q_6 = q_2 - q_5 \quad (24)$$

Enfin, on écrit que la position de l'articulation 7 par rapport à 6 est égale à celle de 8 par rapport à 3 :

$$q_7 = q_5 - q_2 \quad (25)$$

Enfin, nous devons exprimer q_4 en fonction des articulations actives. Le segment de maintien de la poignée garde un angle constant par rapport à l'embase à l'aide d'un double parallélogramme décrit Figure 6. Les droites (AB), (CD) et (EE') puis les droites (DG) et (EF) sont toujours parallèles. De plus, les droites (CD) et (EF), puis les droites (EF) et (EE') sont perpendiculaires. Il vient donc immédiatement que :

$$q_4 = \pi/2 - q_5 \quad (26)$$

Ainsi, nous avons calculé les relations de contraintes. On peut calculer la jacobienne de contrainte définie par :

$$\mathbf{G}^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{q}_p}{\partial \mathbf{q}_a} \end{pmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Ceci nous permet de calculer les couples moteurs et donc, le MDI complet de l'interface médicale. En effet, par conservation de puissance :

$$\dot{\mathbf{q}}_{ar} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{q}_a}{\partial \mathbf{q}_a} \\ \frac{\partial \mathbf{q}_a}{\partial \mathbf{q}_p} \\ \frac{\partial \mathbf{q}_a}{\partial \mathbf{q}_a} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_a \quad \text{donne :} \quad \mathbf{\Gamma}_m = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial \mathbf{q}_a}{\partial \mathbf{q}_a} \right]^T & \left[\frac{\partial \mathbf{q}_p}{\partial \mathbf{q}_a} \right]^T \end{bmatrix} \mathbf{\Gamma}_{ar}$$

$$\text{soit : } \mathbf{\Gamma}_{am} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{\Gamma}_{ar} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{G}^T \end{bmatrix} \mathbf{\Gamma}_{ar}$$

\mathbf{I}_3 étant la matrice d'identité de dimension 3x3. Connaissant le MDI, nous allons déterminer les paramètres à identifier.

IV.3. Paramètres de base identifiables

A l'aide du logiciel SYMORO+, nous avons calculé les paramètres de base de la structure arborescente équivalente en considérant que les termes de frottements étaient négligeables sur les articulations passives :

Corps1: ZZ1R, MX1, MY1R, FV1, FS1 et OFFSET1
 Corps2: XX2R, XY2, XZ2R, YZ2, ZZ2R, MX2R, MY2, FV2, FS2 et OFFSET2
 Corps3: XX3R, XY3, XZ3R, YZ3, ZZ3R, MX3R, MY3
 Corps4: XX4R, XY4, XZ4, YZ4, ZZ4, MX4 et MY4
 Corps5: XX5, XY5, XZ5, YZ5, ZZ5, MX5R, MY5, FV5, FS5 et OFFSET5
 Corps6: XX6, XY6, XZ6, YZ6, ZZ6, MY6

Les formules de regroupements étant :

ZZ1R=IA1 + d4²*M4 + d3²*(M3 + M4) + YY2 + YY3 + YY4 + ZZ1 + d6²*M6 + YY5 + YY6
 MY1R=MY1 + MZ2 + MZ3 + MZ4 + MZ5 + MZ6
 XX2R=-d3²*(M3 + M4) + XX2 - YY2 - YY6
 XZ2R=-(d3*(MZ3 + MZ4)) + XZ2
 ZZ2R=IA2 + d3²*(M3 + M4) + ZZ2
 MX2R=d3*(M3 + M4) + MX2 + MX6
 XX3R=-d4²*M4 + XX3 - YY3 - (d6²*M6 + YY5)
 XZ3R=-d4*MZ4 + XZ3 - d6*MZ6
 ZZ3R=IA5 + d4²*M4 + d6²*M6 + ZZ3

MX3R=d4*M4 + MX3 + d6*M6/d3
 XX4R=XX4 - YY4
 MX5R=d6*M6 + MX5 - d6*M6/d3

Maintenant, nous nous intéressons aux regroupements de la structure parallélogramme. Dans une telle structure les corps opposés sont toujours parallèles, par suite, ils ont même vitesse angulaire absolue. Il est donc possible de regrouper les termes d'inerties.

Nous avons pour les corps opposés 2 et 6:

XX2R = XX2R+XX6, XY2R = XY2+XY6, XZ2R = XZ2R+XZ6, YZ2R = YZ2+YZ6, ZZ2R = ZZ2R+ZZ6,

De même, pour les corps opposés 3 et 5 :

XX3R = XX3R+XX5, XY3R = XY3+XY5, XZ3R = XZ3R+XZ5, YZ3R = YZ3+YZ5, ZZ3R = ZZ3R+ZZ5

Les paramètres du segment de maintien de la poignée se regroupent intégralement avec ceux du corps 1 car l'orientation du corps 4 est constante par rapport au premier corps. On obtient donc :

ZZ1R = ZZ1R+XX4R et MX1R = MX1R+MY4

Concernant les termes de gravité, on peut vérifier les regroupements à l'aide d'une analyse QR. On simule des trajectoires aléatoires sur les variables actives : il vient que les paramètres MX5R et MY5 peuvent être identifiés.

Il vient que, les inerties des bielles constituant le double parallélogramme sont regroupés avec les inerties des corps respectivement parallèles. On montre, à l'aide du raisonnement précédent et d'une analyse QR que l'on peut identifier les termes MY de chaque bielle. Cependant, ces dernières sont fines et symétriques. Ces termes sont pratiquement nuls. On décide donc de les négliger dans la modélisation du bras. On montre aussi que les paramètres de la pièce de renvoi CDG sont regroupés avec ceux de l'embase. Ceci provient que cette pièce garde une orientation constante par rapport à l'embase.

Finalement les paramètres inertiels de base sont :

Corps 1: ZZ1R, MX1R, MY1R, FV1, FS1, OFFSET1
 Corps 2: XX2R, XY2R, XZ2R, YZ2R, ZZ2R, MX2R, FV2, FS2, OFFSET2
 Corps 3: XX3R, XY3R, XZ3R, YZ3R, ZZ3R, MX3R, MY3R
 Corps 5: MX5R, MY5, FV5, FS5, OFFSET5
 Corps 6: MY6

Certains de ces paramètres sont pratiquement nuls. Après les tests d'identification, on pourra les éliminer automatiquement comme dans [13]. En effet, en règle générale, ces paramètres possèdent un fort écart type relatif et sont difficilement détectables.

V. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Après avoir modélisé une branche 3ddl de l'interface et calculé les paramètres de base, nous pouvons effectuer des tests d'identification. Cette partie présente les résultats expérimentaux obtenus. Afin d'obtenir des résultats probants et fiables, nous avons conçu des essais séparés. En effet, à l'aide de ce type d'essais, nous pouvons dégager les modèles de frottements et de gravité qui sont prépondérants en basses vitesses ainsi que le modèle inertiel prépondérant dans les grandes vitesses. En d'autres termes, ce type d'essais permet d'exciter au mieux un nombre maximal de paramètres dynamiques de la branche 3ddl. Enfin, une concaténation de ces tests sera effectuée pour faire une identification globale. Cette dernière donnera des résultats exploitables pour améliorer la conception mécanique et/ou les lois de commandes.

V.1. Identification du modèle de frottements

On se propose d'identifier le modèle de frottement pour les trois axes motorisés. Pour ce faire, on envoie des paliers de vitesse croissants. La mesure du courant n'est pas suffisamment précise pour ce type d'identification. On enregistre alors la consigne variateur (en rads-1). On convertit ensuite en Nm avec la constante vitesse/couple qui a été identifiée à 157.55 rads-1/Nm. Tableau 2 présente les résultats :

	Termes	Valeurs	Ecart type
Axe motorisé 1	FV1 (Nm/rads ⁻¹)	4,4 10 ⁻²	4 10 ⁻⁵
	FS1 (Nm)	0,12	4 10 ⁻³
Axe motorisé 2	FV2 (Nm/rads ⁻¹)	4,0 10 ⁻²	2,5 10 ⁻⁵
	FS2 (Nm)	0,10	2.6 10 ⁻³
Axe motorisé 5	FV5 (Nm/rads ⁻¹)	4.0 10 ⁻²	4 10 ⁻⁵
	FS5 (Nm)	0,11	4 10 ⁻³

Tableau 2 : Valeurs des paramètres de frottement identifiés

On remarque donc que les résultats sont proches pour les 3 axes motorisés et qu'ils sont cohérents. Cependant, la valeur identifiée pour le frottement visqueux est à prendre avec précaution. En effet, on constate que chaque FVi vaut environ 3% de la constante couple/vitesse qui vaut 1/157,55. Or, sachant que l'erreur relative minimale commise sur la calibration de la constante de conversion peut être prise égale à 1%, il vient que la valeur du frottement visqueux peut varier de 30% environ, ce qui est conséquent. En revanche, la valeur identifiée pour le frottement sec est correcte. Pour ce type de transmission, les valeurs peuvent varier de 50 à 150 mNm. Par suite, on admettra que les valeurs identifiées par ces tests seront les valeurs nominales. Figure 7 nous montre le type de courbes obtenues pour l'identification des frottements.

Dans tous les tests qui suivent (paragraphe V.2 et V.3), nous mesurons le couple articulaire via le courant injecté aux moteurs. Il a été vérifié que nous avons $\Gamma_{ar} = NK_c I$. Où Γ_{ar} est le couple articulaire, N le rapport de réduction, K_c la constante de couple du moteur et I le courant injecté au moteur.

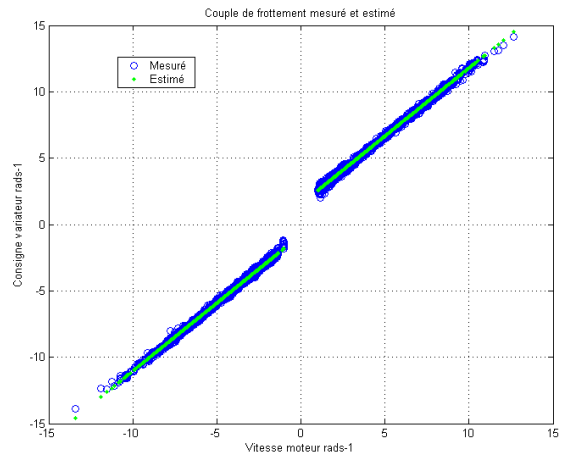


Figure 7 : couple de frottement mesuré (bleu) et estimé (vert)

V.2. Identification du modèle de gravité

L'identification du modèle de gravité revient à identifier les positions du centre de masse de chaque corps multipliées par leurs masses. Une méthode intéressante fut proposée par Spetch et Isermann [23]. La méthode consiste à utiliser des allers et retours à vitesse constante et faible sur de grands débattements. Ce type de trajectoires permet de minimiser les effets des inerties et de Coriolis. Ainsi, dans cette partie, nous allons utiliser ces trajectoires pour identifier le modèle de gravité de la branche 3ddl.

L'identification du modèle de gravité revient à identifier les termes MX1, MY1R, MX2R, MX3R, MY3R et MY6. Pour l'identification de ces derniers, nous actionnons l'embase et l'avant bras dans un premier temps, puis l'embase et le bras dans un deuxième temps. Les trajectoires seront des paliers de vitesses constants et faibles. Afin d'obtenir des résultats optimaux, nous concaténons ces deux tests pour effectuer l'identification.

Après expérimentations, regroupement des paramètres et traitements des données, nous obtenons les résultats résumés dans le Tableau 3:

Paramètre	Valeur	Ecart type relatif %
MY1R	-0.026 Kgm	1.0170
FS1	0.1265 Nm	0.6600
OFFSET1	0.025 Nm	7.4497
MX2R	-0.0227 Kgm	0.8823
FS2	0.12278	1.0580
OFFSET2	0.0304 Nm	2.4170
MX3R	-0.0307 Kgm	1.0420
FS5	0.1159 Nm	0.6420
OFFSET5	0.018 Nm	4.2131

Tableau 3 : Résultat de l'identification des paramètres de gravité de la branche 3ddl

Nous avons volontairement omis les termes d'inertie car ces derniers, mal excités, contribuent très peu à la dynamique du système sur de type de trajectoires et possèdent un fort écart type relatif. Les termes MY2R, MY3R, MX5R, MY5 et MY6 n'interviennent pas car ils sont très faibles et

possèdent un fort écart type relatif. Par suite, ces termes sont considérés comme nuls et sont automatiquement éliminés. Après identification des paramètres, on effectue une comparaison directe entre le couple mesuré et le couple reconstruit à l'aide des paramètres identifiés. Figure 8 nous montre la comparaison directe des couples mesurés et reconstruits appliqués à l'avant bras. Le suivi est bon.

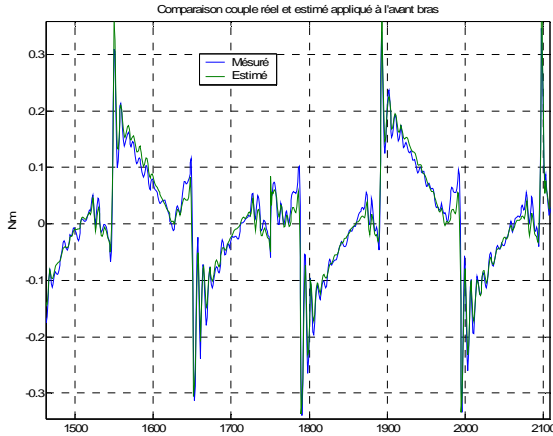


Figure 8 : Comparaison directe du couple de gravité mesuré (bleu) et estimé (vert) de l'avant bras

Pour valider les résultats obtenus lors de ce test d'identification, nous avons effectué une validation croisée sur une autre trajectoire. Par exemple, pour valider les valeurs des paramètres de gravité de l'avant bras (resp. du bras), on bloque l'embase et le bras (resp. l'avant bras) et on actionne l'avant bras (resp. du bras), puis, nous comparons le couple mesuré avec le couple reconstruit à l'aide des paramètres identifiés (Figure 9). La validation des paramètres de gravité de l'embase s'effectue en bloquant le bras et l'avant bras tout en actionnant cette dernière. Enfin, comme validation finale, on peut comparer les valeurs identifiées avec les valeurs calculées avec un logiciel de CAO. Là encore, les valeurs identifiées sont conformes à celles calculées.

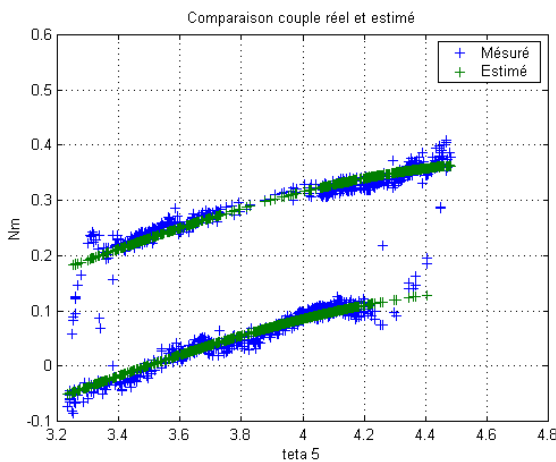


Figure 9 : Validation croisée concernant le couple de gravité de l'avant bras

Dans ce paragraphe, nous avons identifié les termes intervenant dans le modèle de gravité d'une branche 3ddl. Il s'agit des termes MY1R, MX2R et MX3R, les autres termes étant pratiquement nuls. Nous avons également conçu un type de trajectoire permettant d'identifier ces termes avec un nombre réduit de tests à effectuer.

V.3. Identification globale des paramètres inertiels

Après avoir identifié les termes de frottements et de gravité, nous allons identifier les termes d'inertie, i.e. identifier : ZZ1R, XX2R, XY2R, XZ2R, YZ2R, ZZ2R, XX3R, XY3R, XZ3R, YZ3R, et ZZ3R.

Nous allons nous inspirer des tests effectués précédemment : nous allons faire pivoter l'embase tout en actionnant le bras ou l'avant bras. Les deux tests expérimentaux seront ensuite concaténés afin d'obtenir des résultats globaux. Les trajectoires utilisées seront des sinusoides vobulées utilisant le maximum de débattement (Figure 10).

Nous déterminons les paramètres identifiables à l'aide de l'analyse QR. Il s'avère que les paramètres de gravité sont difficilement identifiables, excepté MX3R. Ceci provient principalement du fait que les débattements ne sont pas suffisants pour dissocier correctement les termes d'inertie et de gravité, accélération et position étant en phase dans les trajectoire sinusoidales.

Pour remédier à ce problème, nous avons concaténé les tests d'identification du modèle de gravité avec les tests d'identification des inerties. Après expérimentations, regroupement des paramètres et traitements des données, nous obtenons les résultats résumés dans le Tableau 4 :

Paramètre	Valeur	Ecart type relatif %
ZZ1R	0.0510 Kgm ²	0.4480
MY1R	-0.0260 Kgm	1.200
FS1	0.1179 Nm	0.7823
XX2R	-0.0209 Kgm ²	0.8488
ZZ2R	0.0295 Kgm ²	0.3538
XZ2R	0.008 Kgm ²	1.1600
MX2R	-0.0225 Kgm	0.7660
FS2	0.1240 Nm	0.8120
OFFSET2	0.0200 Nm	3.3470
XX3R	-0.0110 Kgm ²	1.2500
ZZ3R	0.0130 Kgm ²	0.4320
MX3R	-0.0310 Kgm	0.4130
FS5	0.1152 Nm	1.2580
OFFSET5	0.0300 Nm	1.100

Tableau 4 : résultat de l'identification globale des termes inertiels d'une branche 3ddl

Après identification des paramètres, on effectue une comparaison directe. Figure 11 nous montre la comparaison entre le couple mesuré et reconstruit appliqués au bras. Le suivi est très bon. Les résultats montrent que les termes de gravité et de frottements secs n'ont pratiquement pas varié. Cela implique que ces termes sont stables et correctement identifiés. Nous avons également effectué des validations croisées afin de vérifier la stabilité et la cohérence des valeurs des termes inertiels. Enfin, les valeurs identifiées sont conformes aux valeurs calculées par un logiciel de

CAO. Les termes de frottements visqueux sont absents du tableau 4. Ceci vient du fait que leurs contributions sont faibles pour les essais concaténés. Ils n'ont aucune influence sur l'identification des autres paramètres dynamiques.

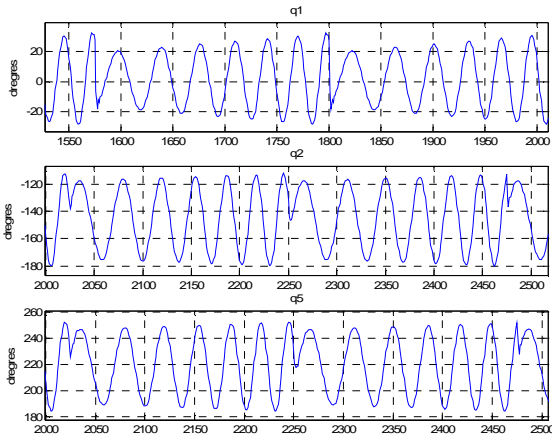


Figure 10 : Trajectoires utilisées pour l'identification globale

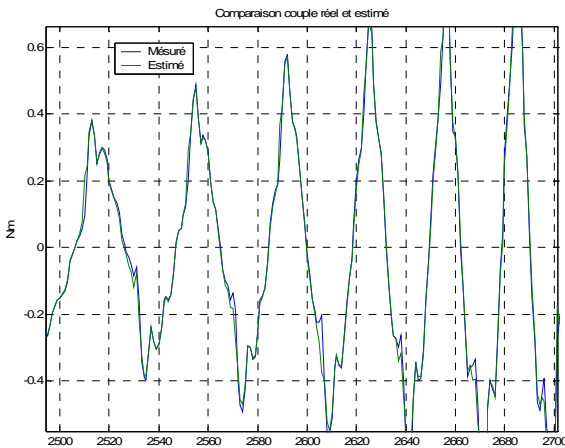


Figure 11 : Comparaison directe entre le couple mesuré (bleu) et le couple estimé (vert) exercé sur le bras

Dans ce paragraphe, nous avons identifié les inerties des corps constituant la branche 3ddl de l'interface médicale. Cependant, nous avons du concaténer deux types de tests (gravité et inertie) afin de dissocier les termes de gravité précédemment identifiés aux termes d'inertie. Les différentes validations effectuées ont montré que les résultats sont stables et cohérents. Ainsi, les résultats exprimés tableau 4 sont directement exploitables pour améliorer les lois de commandes et/ou la conception de l'interface.

V.I. EXPLOITATION DES RESULTATS ET INTERET DE LA DEMARCHE PRESENTEE

L'identification effectuée nous permet de savoir ce que va ressentir l'opérateur quand il va interagir avec l'interface. Par exemple, on peut calculer la masse apparente de la branche 3ddl vue de l'opérateur. On écrit en ne retenant que les termes inertiels et de frottements secs :

$$\Gamma = \mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_s \text{sign}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{F}_{op} \quad (27)$$

Où \mathbf{J} est la jacobienne définie par la relation $\mathbf{J}(\mathbf{q})d\mathbf{q} = d\mathbf{X}$, \mathbf{X} étant la position de la poignée manipulée par l'opérateur, \mathbf{F}_{op} est la force exercée par l'opérateur. On écrit ensuite que : $\ddot{\mathbf{X}} = \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}$. Il vient donc que la matrice de la masse apparente ressentie par l'opérateur est la matrice définie par :

$$\mathbf{M}_{ap} = (\mathbf{J}^T)^+ \mathbf{A}(\mathbf{q})\mathbf{J}^+$$

Car, par définition la masse apparente est le rapport force/accélération au niveau opérateur. Dans notre cas, la matrice jacobienne est une matrice 3x3 inversible, on écrit donc directement que :

$$\mathbf{M}_{ap} = \mathbf{J}^{-T} \mathbf{A}(\mathbf{q})\mathbf{J}^{-1} \quad (28)$$

Le calcul de la matrice d'inertie $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ s'effectue de la manière suivante : on calcule la matrice d'inertie de la structure arborescente équivalente notée $\mathbf{A}_{ar}(\mathbf{q})$, ensuite, connaissant les relations de contraintes imposées par la boucle parallélogramme, on écrit directement que :

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{G}^T \end{bmatrix} \mathbf{A}_{ar}(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{G} \end{bmatrix}$$

En se plaçant dans une configuration qui est naturelle pour l'opérateur ($q_1 = q_5 = 0^\circ$ et $q_2 = 90^\circ$ par exemple), la masse apparente vue de l'opérateur varie de 200g à 500g. Ces valeurs extrêmes sont vérifiées pour d'autres configurations.

Nous allons maintenant nous intéresser aux frottements ressentis par l'opérateur. D'après ce qui précède, la matrice des frottements ressentis par l'opérateur est égale à :

$$\mathbf{F}_{sop} = \mathbf{J}^{-T} \mathbf{F}_s \quad (29)$$

Pour des configurations qui sont naturelles pour l'opérateur, nous trouvons des coefficients de frottements qui varient de 0,3 N à 0,5 N. En d'autres termes, l'opérateur devra fournir un effort constant équivalent à soulever une masse de 50g.

Nous voyons donc plusieurs intérêts à effectuer ce type d'identification : nous connaissons les paramètres inertiels qui interviennent dans la dynamique du système, on peut compenser, grâce à une commande prédictive, les couples perturbateurs tels que la gravité, prédire les performances de l'interface en calculant la masse apparente vue de l'opérateur ...

La méthode d'identification décrite tout au long de l'article présente aussi l'avantage d'être répétable et applicable sur tout type d'interface haptique. En effet, nous avons utilisé le

formalisme issu de la robotique sans faire d'hypothèses particulières.

V.I.I. CONCLUSION ET FUTURS TRAVAUX

Les résultats expérimentaux obtenus nous ont permis de dégager une méthode de modélisation et d'identification basée sur le modèle inverse et les moindres carrés issus du formalisme de la robotique. En outre, aucune hypothèse particulière n'est faite. Les nombreuses validations croisées ont également permis de dégager les tests essentiels pour obtenir un modèle dynamique suffisant et fiable.

La méthode présentée est répétable, fiable et applicable à tout type d'interfaces haptiques. En effet, comme une interface haptique est une structure mécanique polyarticulée, on pourra toujours écrire le modèle inverse linéairement par rapport aux paramètres dynamiques de base. On peut connaître explicitement les paramètres inertiels et, par extension, la distorsion introduite entre l'opérateur et le monde exploré. L'identification de la seconde branche est cours. Les premiers résultats obtenus sont proches de ceux présentés tout au long de l'article.

Néanmoins, la principale limite de la méthode exposée réside dans le choix des trajectoires excitantes. En effet, il se peut l'on ne dispose que d'un certain type de trajectoire et/ou que les capacités mécaniques de l'interface ne permettent pas une identification globale. La principale ressource pour résoudre ce problème est de concaténer plusieurs essais qui excitent chacun un groupe de paramètres inertiels. C'est ce qui a été fait tout au long de ce papier.

Les prochains travaux s'axeront principalement sur l'identification de la compliance en statique et en dynamique, ainsi que l'identification de l'interface avec boucle cinématique fermée.

RÉFÉRENCES

- [1] : J.J. Abbot, A.M. Okamura, "A sufficient condition for passive virtual walls with quantization effects", In: *Proc. IMECE 2004*, USA, pp. 1065-1073.
- [2] : R. J. Addams, M. Moreyra et B. Hannaford, "Stability and performance of haptic displays: theory and experiments", In: *Proc. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, Anaheim, CA, 1998, pp. 227-34.
- [3] : J. Colgate et G. Schenkel, "Passivity of a class of sampled data systems: Application to haptic interfaces", In: *American Control Conference*, Baltimore, Maryland, June 1994, pp. 3236-3240.
- [4] : D. Creusot et W. Khalil, "SYMORO+: A system for the symbolic modelling of robots", In: *Robotica*, vol. 15, 1997, pp. 153-161.
- [5] : N. Diolaiti, G. Niemeyer, F. Barbagli et J. Kenneth Salisbury, "A criterion for the passivity of haptic devices", In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Barcelona, April 2005, pp. 2463-2468.
- [6] : A. Frisoli, M. Bergamasco, "Experimental Identification and Evaluation of Performance of a 2DOF Haptic Display", In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Taipei, Septembre 2003, pp. 3260-3265
- [7] : M. Gautier, "Contribution à la modélisation et à l'identification des robots", *Ph. D. dissertation*, Université de Nantes, 1990.
- [8] : M. Gautier, W. Khalil et P.P. Restrepo, "Identification of the dynamic parameters of a closed-loop robot", In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Nagoya, May 1995, pp. 3045-3050.
- [9] : M. Gautier, "Dynamic Identification of Robots with Power Model", In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Albuquerque USA, Avril, 1997, pp. 1922-1927
- [10] : M. Gautier, "Numerical calculation of the base inertial parameters of robots", *J. of Robotic Systems*, Vol. 8(4), august 1991, pp. 485-506
- [11] : M. Gautier and W. Khalil, "Exciting trajectories for the identification of base inertial parameters of robots", In: *Proc. Of the 30th Conf. on Decision and Control*, Brighthelm, England, December 1991, pp. 494-499
- [12] : F. Gosselin, C. Bidard, J. Brisset, "Design of a high fidelity haptic device for telesurgery", In: *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Barcelona Spain, April 2005, pp 206-211.
- [13] : S. Guegan, "Contribution à la modélisation et l'identification dynamique des robots parallèles", Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, *Ph. D. dissertation*, Nantes, Décembre 2003.
- [14] : M. Moreyra et B. Hannaford, "A Practical Measure of Dynamic Response of Haptic Devices", In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Leuven Belgium, May 1998, pp. 369-374
- [15] : W. Khalil et E. Dombre : In: *Modeling, identification and control of robots*. Hermes Penton, London-Paris, 2002.
- [16] : W. Khalil et J.F. Kleininger, "A new geometric notation for open and closed loop robots", In: *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, San Francisco USA, April 1986, pp. 1147-1180.
- [17] : F. Khatounian, A. Janot, S. Moreau, C. Bidard, E. Monmasson et M. Gautier, "Parameter Identification of a Single Degree of Freedom Haptic Interface", In: *14th IFAC Symposium on System Identification, SYSID 2006*, Newcastle Australia, March 2006, pp. 249-254.
- [18] : C. D. Lee, D. A. Lawrence, and L. Y. Pao, "Dynamic Modeling and Parameter Identification of a Parallel Haptic Interface", In: *Proc. 10th Int. Symp. Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, IEEE Virtual Reality Conf.*, Orlando, March 2002, pp. 172-179.
- [19] : Ch.E. Lemaire, P.O. Vandanjon, M. Gautier et Ch. Lemaire, "Dynamic Identification of a Vibratory Asphalt Compactor for Contact Efforts Estimation", In: *14th IFAC Symposium on System Identification, SYSID 2006*, Newcastle Australia, March 2006, pp. 973-978.
- [20] : H. Mayeda, K. Yoshida et K Osuka, "Base parameters of manipulator dynamic model", In: *IEEE J. of Robotics and Automation*, 1990 : 312-321
- [21] : M.T. Pham, M. Gautier et Ph. Poignet, "Identification of joint stiffness with bandpass filtering", In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, May 2001, pp. 2867-2872.
- [22] : B. Raucant, "Identification des paramètres dynamique des robots manipulateurs", *Ph. D. dissertation*, Université de Louvain, Belgique, 1990.
- [23] : R. Spetch, et R. Isermann, "On-line identification of inertia, friction and gravitational forces applied on industrial robots", In: *Proc. IFAC, Symp. on robots control, SYROCO'88*, pp. 88.1-88.6.
- [24] : G. Venture, M. Gautier, W. Khalil et Ph. Bodson., "Identification of the dynamic parameters of a car: simulation and experimental results", In: *IFAC symposium AAC 2004*, Salerno, Italia, 2004.