

Identification paramétrique et commande des systèmes multi-corps à flexibilités localisées

Anthony JUBIEN
anthony.jubien@irccyn.ec-nantes.fr

Résumé : Des modèles dynamiques précis sont nécessaires pour l'élaboration de simulateurs précis et pour la conception de commande des robots. Si la modélisation et l'identification des robots rigides sont aujourd'hui des domaines assez bien explorés, il n'en va pas de même pour les robots à flexibilités localisées où seulement une partie des variables articulaires sont mesurées. Très récemment, une nouvelle technique d'identification a été proposée: la méthode *DIDIM* (Direct and Inverse Dynamic Identification Model). *DIDIM* utilise les modèles dynamiques inverse et direct du robot. C'est une méthode à erreur de sortie qui n'utilise pas les mesures des positions articulaires et peut donc être étendue aux robots à flexibilités localisées. Les paramètres optimaux minimisent le carré de la norme de l'erreur entre les couples moteurs réels et les couples moteurs simulés en boucle fermée, assumant la même loi de commande et la même trajectoire de référence pour le robot réel et le robot simulé. Elle a été validée sur un robot rigide 2 axes et un robot rigide 6 axes. Une étude approfondie de cette méthode a été effectuée et son extension sur un robot à flexibilité localisée est développée.

Mot clés : JDOC 2013, robot, manipulateur, identification, commande, paramètre, dynamique, modèle, raideur, flexible.

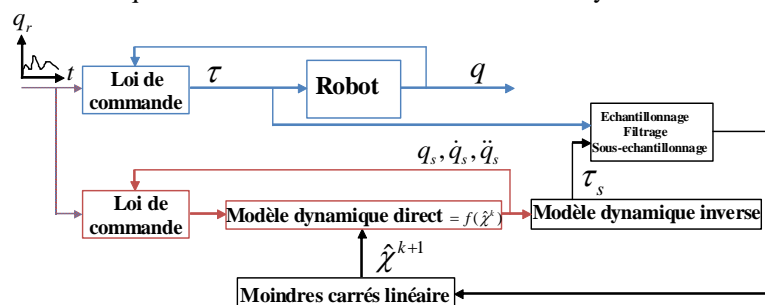
1 Contexte

Des modèles dynamiques précis sont nécessaires pour une meilleure connaissance des systèmes mécatroniques, pour l'élaboration de simulateurs précis et pour l'élaboration des commande. Si la modélisation et l'identification de systèmes mécaniques multicorps rigides sont aujourd'hui des domaines assez bien maîtrisés et assez bien explorés en robotique [1], il n'en va pas de même pour les systèmes à flexibilités localisées.

Les systèmes à flexibilités localisées peuvent être vus comme une extension des systèmes rigides, réalisant un compromis entre les systèmes rigides et les systèmes souples à flexibilités réparties [2]. Pour de tels systèmes, les flexibilités sont localisées dans les transmissions ou dans la structure. Concernant l'identification de tels systèmes, il existe deux approches principales: les techniques issues de l'analyse modale et les techniques issues des systèmes rigides. Le principal avantage des techniques issues de l'identification des systèmes multicorps rigides est que les paramètres identifiés sont les paramètres physiques du système et que ces derniers sont plus faciles à interpréter.

Très récemment, une nouvelle technique d'identification a été proposée: la méthode *DIDIM* (Direct and Inverse Dynamic Identification Model) [3]. *DIDIM* (voir figure de droite) est une méthode d'identification hors ligne récente des paramètres dynamiques des robots qui utilise les modèles inverse et direct du système. C'est une méthode à erreur de sortie qui n'utilise pas les mesures des positions articulaires. Les paramètres optimaux minimisent le carré de la norme de l'erreur entre les couples moteurs réels et les couples moteurs simulés en boucle fermée, assumant la même loi de commande et la même trajectoire de référence pour le robot réel et le robot simulé.

La méthode *DIDIM* a été validée avec précision sur plusieurs robots à plusieurs degrés de liberté (*ddl*). Elle est robuste vis-à-vis des bruits de mesures des positions articulaires car la matrice d'observation est calculée avec des données de positions, vitesses



et accélérations articulaires simulées. De plus, sa convergence est très rapide. Ainsi, la méthode *DIDIM* peut être avantageusement étendue aux systèmes à flexibilités localisées pour lesquels la mesure des *ddl* élastiques n'est pas disponible.

2 Objectifs scientifiques

Les objectifs scientifiques portent sur l'étude de la méthode *DIDIM* pour l'identification hors ligne des systèmes à flexibilités localisées et sur son application en ligne sur des systèmes rigides et à flexibilités localisées. Le travail à effectuer est décomposé en plusieurs étapes :

Etude de la méthode *DIDIM* hors-ligne sur les systèmes à flexibilités localisées :

- Synthèse bibliographique;
- Etude et validation sur un axe flexible de robot;
- Etude et validation sur un robot à plusieurs *ddl* flexible.

Application en ligne de la méthode *DIDIM*:

- Synthèse bibliographique;
- Etude et validation sur robot un axe rigide et un robot un axe avec flexibilité articulaire;

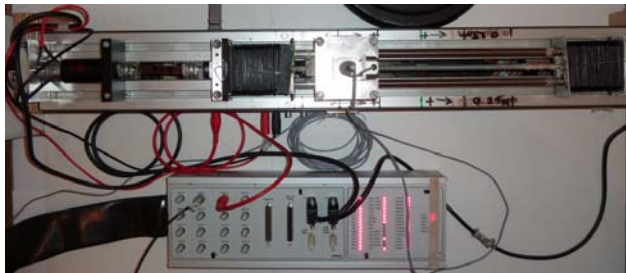
Etude et validation sur un robot multi *ddl* rigide puis sur un robot multi *ddl* avec flexibilités articulaires.

3 Démarche, déroulement et principaux résultats obtenus

Plusieurs méthodes d'identification ont été étudiées sur un robot un axe rigide et un axe à flexibilité localisée (voir photo de droite).

La méthode du modèle a été étudiée sur le robot flexible. La méthode permet de s'affranchir de la mesure de la position du *ddl* flexible. Le robot est simulé en boucle fermée avec la même loi de commande et la même consigne que le robot réel. Une identification des paramètres du modèle dynamique rigide (sans tenir compte de la flexibilité) avec la méthode *DIDIM* est nécessaire afin de trouver les conditions initiales sur les paramètres inertiels et les frottements pour initialiser l'algorithme. Les paramètres du robot flexible sont bien identifiés mais la convergence est longue. Les recherches suivantes ont consisté à appliquer la méthode *DIDIM* sur le robot flexible afin de diminuer le temps de calcul nécessaire.

La première technique développée utilise deux étapes. La première étape identifie la fréquence du mode flexible à entrée bloquée. Ce paramètre de fréquence optimale est ensuite utilisé dans la deuxième étape pour l'identification des paramètres dynamiques du robot flexible avec la méthode *DIDIM*. Cette technique nécessite évite l'utilisation de la position du *ddl* flexible. Elle permet d'identifier les paramètres avec un temps de calcul réduit comparé à la méthode décrite précédemment.



Une évolution de la méthode *DIDIM* évite de fixer les bandes passantes des différents *ddl* du robot durant l'exécution de l'algorithme. Cette évolution est appelée *DIDIM* à bande passante libre et utilise comme conditions initiales sur les paramètres du robot les valeurs *a priori* des inerties actionneurs et une valeur nulle pour les autres paramètres. Cette technique a été transposée sur le robot flexible sous la forme d'une procédure en trois étapes. Premièrement le modèle dynamique rigide du bras flexible est identifié avec la méthode *DIDIM* à bande passante libre. Ensuite le ratio d'inertie coté moteur et coté articulaire et la valeur de la fréquence du mode flexible à entrée bloquée sont identifiés par un algorithme de programmation non linéaire grâce à l'inertie totale et aux frottements identifiés durant la première étape. Enfin tous les paramètres dynamiques du robot sont identifiés plus précisément à partir des valeurs identifiées dans les étapes un et deux en utilisant la méthode *DIDIM* à bande passante libre. Concernant le temps

de calcul, la méthode *DIDIM* est 10 fois plus rapide que les méthodes classiques à erreur de sortie.

L'application d'une méthode à erreur de sortie classique sur un robot rigide à 6 *ddl* (le robot Staubli TX40, voir photo de gauche) a été effectuée à des fins de comparaisons avec la méthode *DIDIM*.

La méthode utilise deux étapes. La première étape est une identification séquentielle axe par axe. Une identification globale est effectuée durant la deuxième étape. Tous les paramètres de base sont des variables de

l'algorithme. Cette méthode demande un temps de calcul conséquent et le critère est peu sensible aux valeurs des paramètres mal excités qui prennent des valeurs quelconques. Aucun outil de l'algèbre linéaire ne peut être utilisé pour résoudre ce problème. Cela montre clairement l'intérêt de la méthode *DIDIM* face aux méthodes à erreur de sortie classiques.

L'*IRCCyN* possède un robot à 7 *ddl*, le Kuka LWR (voir photo de droite). La modélisation de son modèle dynamique rigide et flexible a été effectuée selon la description de Denavit Hartenberd Modifiée. L'identification du modèle dynamique rigide du robot est en cours et un simulateur du robot est en cours de développement.

L'identification en-ligne des paramètres du robot un axe rigide couplé à une commande de type contrôle en couple calculé a été implémentée. Elle évite l'utilisation des position, vitesse et accélération articulaires en utilisant les position, vitesse et accélération de consigne pour identifier les paramètres dynamiques du robot.



4 Conclusion et perspectives

Les travaux effectués jusqu'à présent sont valorisés dans 10 conférences internationales. D'autres publications en conférence et en revue ont été déposées.

Des essais à sortie bloquée seront effectués sur le Kuka LWR pour identifier ses raideurs articulaires. L'identification du modèle dynamique flexible du robot selon la méthode *DIDIM* sera étudiée.

L'identification en-ligne des paramètres du robot Staubli TX40 couplé avec une commande de type contrôle en couple calculé sera effectuée.

Références

- [1] J. Hollerbach, W. Khalil, et M. Gautier, « Model Identification », in *Springer Handbook of Robotics*, Springer, 2008.
- [2] W. Khalil et M. Gautier, « Modeling of mechanical systems with lumped elasticity », presented at the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000, p. 3964-3969.
- [3] M. Gautier, A. Janot, et P.-O. Vandanjon, « A New Closed-Loop Output Error Method for Parameter Identification of Robot Dynamics », *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012. doi: 10.1109/TCST.2012.2185697.

Références de l'auteur

- Gautier, M., Janot, A., **Jubien, A.**, Vandanjon, P.O., 2011. Joint stiffness identification from only motor force/torque data. 50^{ème} IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando (Floride, Etats-Unis), 12-15 décembre 2011. pp. 5088-5093.
- Janot, A., Gautier, M., **Jubien, A.**, Vandanjon, P.O., 2011. Experimental joint stiffness identification depending on measurements availability. 50^{ème} IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando (Floride, Etats-Unis), 12-15 décembre 2011. pp. 5112-5117.
- Jubien, A.**, Gautier, M., Janot, A., Vandanjon, P.O., 2012. Méthode à erreur de sortie pour l'identification en boucle fermée des paramètres dynamiques d'un robot à flexibilité localisée, sans mesure de flexibilité. 7ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Grenoble (France), 4-6 juillet 2012. pp. 683-688.
- Gautier, M., Janot, A., **Jubien, A.**, Vandanjon, P.O., 2012. New Closed-Loop Output Error method for Robot Joint Stiffness identification. 16ème IFAC Symposium on System Identification, SYSID 2012, Bruxelles (Belgique) 11-13 juillet 2012. pp. 852-857.
- Gautier, M., **Jubien, A.**, Janot, A., 2012. New Closed-Loop Output Error method for Robot Joint Stiffness Identification with Motor Force/Torque data. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, KaoHsiung (Taiwan), 11-14 juillet 2012. pp.592-597.

- Gautier, M., **Jubien, A.**, Janot, A., Robet, P.P., 2012. A new method for the identification of flexible joint manipulators using motor force/torque data. 10^{ème} IFAC Symposium on Robot Control, Dubrovnik (Croatie), 5-7 septembre 2012. pp. 19-24.
- Robet, P.P., Gautier, M., **Jubien, A.**, Janot, A., 2012. A new output error method for a decoupled identification of electrical and mechanical dynamic parameters of DC motor-driven robots. 10^{ème} IFAC Symposium on Robot Control, Dubrovnik (Croatie), 5-7 septembre 2012. pp.25-30.
- Gautier, M., **Jubien, A.**, Janot, A., Robet, P.P., 2013. Dynamic Identification of flexible joint manipulators with an efficient closed loop output error method based on motor torque output data. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe (Allemagne). 6-10 mai 2013 (acceptée)
- Gautier, M., **Jubien, A.**, Janot, A., 2013. A new iterative online dynamic identification method of robots from only force/torque data. 9^{ème} Asian Control Conference, Istanbul (Turquie). 23-26 juin 2013. (acceptée)
- Jubien, A.**, Gautier, M., Janot, A., 2013. Effectiveness of the DIDIM method compared with a usual CLOE method for parameter identification of robot dynamics. 9^{ème} Asian Control Conference, Istanbul (Turquie). 23-26 juin 2013. (acceptée)