

---

# Contrôle d'un servomoteur en couple: compensation de la gravité

---

État de l'art et bibliographie

GRY Nicolas, CHABRIER Julien, CARAVATI Matteo

## TABLE DES MATIÈRES

<b>Table des matières</b>	<b>1</b>
<b>Table des figures</b>	<b>1</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>1</b>
<b>Introduction</b>	<b>2</b>
Contexte . . . . .	2
Enjeux . . . . .	2
<b>I Modélisation d'un moteur à courant continu</b>	<b>2</b>
I.1. Relation courant - couple . . . . .	2
I.2. Modèles de frottement . . . . .	4
I.3. Identification empirique du moteur . . . . .	6
<b>II Application du modèle</b>	<b>7</b>
II.1. PID et Feedforward . . . . .	7
II.2. Contrôle en couple de moteurs commandés en position . . . . .	8
<b>IIISynthèse et travaux futurs</b>	<b>10</b>
<b>Références</b>	<b>11</b>

## TABLE DES FIGURES

1	Graphe d'un exemple de force de Coulomb (cf. [3]) . . . . .	4
2	Graphe d'un exemple de force de Stribeck (cf. [2]) . . . . .	5
3	Couples mesuré et estimé par différents models. Le couple mesuré est en pointillé, les lignes pleines sont les couples estimés. . . . .	6
4	Erreur quadratique moyenne (en degrés) (et écarts types) pour chaque DoF et stratégie de contrôle, avec et sans décalage temporel (Source [2]) . . . . .	7
5	Délais (et écart-type) pour chaque DoF et stratégie de contrôle (Source [2]) . . . . .	8
6	Framework du Torque Control System . . . . .	8
7	Diagramme en blocs d'un robot commandé en position. Avec $G$ l'articulation physique, $D$ le contrôleur, $\tau_s$ le couple d'entrée, $\theta$ l'angle de l'articulation, et $\theta_{desired}$ l'angle . . . . .	9

## Liste des tableaux

1	Table des symboles . . . . .	3
---	------------------------------	---

# INTRODUCTION

## Contexte

Nous travaillons sur un projet intitulé « *bras antigravité* » ; ce dernier s'appuie sur le robot *Reachy* développé par *Pollen Robotics*, et plus particulièrement sur les moteurs Dynamixel MX-64 qui le composent. L'objectif final est de pouvoir contrer l'effet de la gravité sur un bras robotisé à 7 degrés de liberté. En règle générale, les servomoteurs Dynamixel sont contrôlés en position, i.e. on les commande par envoi d'une position angulaire objectif et cette dernière est maintenue par la suite par maintien d'un couple maximal. L'idée est d'implémenter un firmware qui permettrait de contrôler ce type de moteur non pas en position mais en couple. Il serait possible de maintenir une certaine position avec juste la bonne quantité de couple appliquée ; dès lors, l'application d'une simple pression sur le bras robot le ferait balancer.

L'implémentation d'un tel firmware est toutefois mise en difficulté par différents points. Le caractère propriétaire du matériel utilisé rend l'implémentation de logiciel embarqué pour ce dernier complexe et fastidieux. Et si l'on s'attelle au démontage du moteur et à l'étude du matériel le composant, on tombe encore sur d'autres complications. Le projet *Dynaban* [2], dont l'objectif était l'implémentation d'un firmware de contrôle en couple pour les servomoteurs MX-64, s'était lancé sur cette route ; la complication rencontrée était la présence importante de bruit sur la lecture de courant faite via les capteurs de la carte du moteur. Ce bruit rend difficile l'utilisation de modèles permettant le calcul de couple moteur, nécessaire à la génération de commande en couple.

## Enjeux

Mais avant tout, pourquoi se lancer sur ce projet ? Le contrôle en couple de servomoteur connaît des applications notamment dans le domaine de la sécurité des cobots (robots collaboratifs). Pour qu'un opérateur humain puisse travailler dans un champ effectif autour d'un robot, il faut que ce dernier ne représente pas un danger quelconque et surtout, qu'il existe des fonctionnalités internes au robot permettant la gestion de certaines situations à risque. Les robots contrôlés en position utilisent généralement un couple maximale pour accéder aux positions cibles qui leur sont demandées. Des actions physiques dirigées contre un humain avec un couple d'un tel ordre peut engendrer des dégâts physiques importants. Dans le cas du contrôle en couple d'un moteur, cela permet au robot de n'utiliser que la quantité de force nécessaire à la réalisation de la tâche qui lui est assignée. Il devient alors possible de placer un opérateur humain dans le champ rapproché du robot.

Ainsi, nous proposons dans ce rapport d'établir un état de l'art quant au contrôle en couple des servomoteurs. Nous allons étudier dans un premier temps les modèles énoncés des moteurs à courant continu ; puis, nous analyserons comment ces modèles ont pu être utilisés pour des commandes en couple.

# I MODÉLISATION D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU

Dans le cadre de ce projet, une bonne modélisation mathématique du problème est impérative. Nous allons exposer dans un premier temps la relation courant-couple existant au sein d'un moteur à courant continu. Puis, nous étudierons les différents modèles de frottements qui ont été utilisés pour calculer le couple de frottement d'un moteur. Enfin, nous aborderons l'identification empirique de certains paramètres liés aux modèles des moteurs à courant continu.

## I.1. Relation courant - couple

Cela passe notamment par une modélisation mathématique du moteur à courant continu qui se trouve dans les servomoteurs que nous manipulons. La modélisation mathématique de ce composant permet de pouvoir déterminer un lien entre le courant délivré au moteur à courant continu et son couple résultant. Ainsi, on peut connaître avec précision la quantité de courant dont le moteur a besoin pour atteindre le couple nécessaire à la compensation du

poids d'une masse attaché à ce dernier.

Dans un article publié en 2004 [5], Tolgay Kara et Ilyas Eker exposent les équations 1 à 7 que nous détaillons ci-après et dans la table 1. Ces équations représentent la modélisation du moteur et permettent d'établir le lien courant - couple dont nous avons besoin.

$$v_a = R_a i_a + L_a \left( \frac{di_a}{dt} \right) + e_a \quad (1)$$

$$e_a = K_m \omega_m \quad (2)$$

$$T_m = K_m i_a \quad (3)$$

$$J_m \left( \frac{d\omega_m}{dt} \right) = T_m - T_s - B_m \omega_m - T_f(\omega_m) \quad (4)$$

$$J_L \left( \frac{d\omega_L}{dt} \right) = T_s - B_L \omega_L - T_d - T_f(\omega_L) \quad (5)$$

$$T_s = k_s (\theta_m - \theta_L) + B_s (\omega_m - \omega_L) \quad (6)$$

Avec

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m, \frac{d\theta_L}{dt} = \omega_L \quad (7)$$

Symbole	Définition	Unité
$v_a$	Tension appliquée aux bornes du moteur	V
$e_a$	Force électromotrice	V
$i_a$	Intensité du courant	A
$T_m$	Couple moteur	N.m
$\omega_m$	Vitesse de rotation du moteur	rad/s
$R_a$	Résistance des armatures du moteur	$\Omega$
$L_a$	Inductance des armatures du moteur	H
$K_m$	Constante du couple moteur	V.s/rad
$k_s$	Constante du lien moteur / charge	N.m/rad
$B_m$	Frottement visqueux du moteur	N.m/(rad/s)
$B_L$	Frottement visqueux de la charge	N.m/(rad/s)
$B_s$	Coefficient d'amortissement de l'arbre	N.m/(rad/s)
$J_m$	Moment d'inertie du moteur	kg.m <sup>2</sup>
$J_L$	Moment d'inertie de la charge	kg.m <sup>2</sup>
$\omega_L$	Vitesse angulaire de la charge	rad/s
$T_d$	Couple de perturbation de la charge	N.m
$T_s$	Couple transmis à l'arbre	N.m
$T_f$	Couple du frottement	N.m

TABLE 1 – Table des symboles

Le modèle décrit ici est un modèle non-linéaire, car prenant en compte des composantes telles que le frottement de Coulomb ou bien la zone morte, qui sont non-linéaires. Le modèle aurait pu être simplifié à un modèle linéaire dans le cas d'un moteur unidirectionnel, mais comme le bras que nous étudions est bidirectionnel (sens horaire et anti-horaire), les moteurs de celui-ci passent par un point où la vitesse de rotation atteint 0 et où le frottement de Coulomb et la zone morte rentrent en compte. Nous reviendrons plus en détail sur ce sujet en 1.2..

Afin d'identifier les systèmes non linéaires, le système mécatronique est considéré comme composé de deux parties : un moteur et une masse. En partant de ce principe, le modèle établi par l'étude conduit à une fonction de transfert d'ordre 4, permettant de conserver le couple de frottement non linéaire. Les systèmes présentant des non-linéarités dynamiques sont abordés à l'aide de méthodes paramétriques alors que les systèmes présentant des non-linéarités statiques sont explorées à l'aide du modèle Hammerstein.

Le modèle Hammerstein permet d'exprimer le système par une partie dynamique linéaire représentée par un modèle AutoRegressive with eXogenous input (ARX) à temps discret (8) et par une partie non-linéaire représentée sous forme de polynôme (fonction  $x$  dans l'équation 8) :

$$\tilde{A}(q^{-1})y(t) = \tilde{B}(q^{-1})x(t) + e(t) \quad (8)$$

$$y(t) = \phi^T(t)\theta + e(t) \quad (9)$$

Le modèle ARX peut par la suite être mis sous la forme d'une régression linéaire (équation 9), ce qui permet une application directe de la méthode des moindres carrés récursifs (RLS) pour l'identification des paramètres.

## I.2. Modèles de frottement

Comme nous l'avons vu, pour commander un moteur en couple, une bonne modélisation mathématique est nécessaire. Or, une partie essentielle de la modélisation du moteur est le calcul de son couple. On peut résumer le couple moteur à la somme de trois composantes selon l'équation (10) :

- le couple inertiel  $T_s$  : lié à l'armature même de l'arbre moteur ;
- le couple de frottement  $T_f$  : lié aux forces de frottements entre le rotor et le stator du moteur ;
- le couple de charge  $T_d$  : lié à la résistance provoquée par l'éventuelle charge attachée au moteur ;

$$T_m = T_s + T_f + T_d \quad (10)$$

Les couples inertiel et de charge peuvent être calculés avec un bilan des forces et/ou le théorème du moment cinétique. La détermination du couple de frottement est plus délicate ; des articles comme "*Experimental Friction Identification of a DC Motor*" [3] et "*Friction identification and compensation in a DC motor*"[9] proposent des approches de modélisation des frottements et testent l'exactitude de ces modèles par l'expérience.

Dans un premier temps, le modèle de frottements de Coulomb est abordé : il s'agit de l'étude des frottements de solide contre solide. On distingue alors deux cas : le cas dit « collé », où il est question de frottements statiques, et le cas dit « glissé », où les frottements sont dynamiques.

Dans le cas collé, le solide dont le mouvement est étudié a une vitesse nulle par rapport au solide contre lequel il est en contact. Les frottements statiques s'opposent aux forces qui tentent de mettre le solide en mouvement ; ils sont décrits par un coefficient de frottements statiques  $F_s$ . Il existe un cas limite de force de frottements statiques maximale avant le passage entre le cas collé et le cas glissé : cette force est appelée force statique de Coulomb et est décrite par le coefficient de frottements de Coulomb  $F_C$ . Ce modèle possède une grande faiblesse : une discontinuité autour des valeurs de vitesse égales à zéro, observable sur la FIGURE 1.

Une fois dans le cas glissé, les forces de frottements sont des forces de résistance qui s'opposent au mouvement de manière strictement linéaire, et sont caractérisées par le coefficient de frottements dynamiques  $F_d$ .

Le modèle de Coulomb, bien qu'utile dans la compréhension des cas de pré-glissement et de glissement, reste très simpliste.

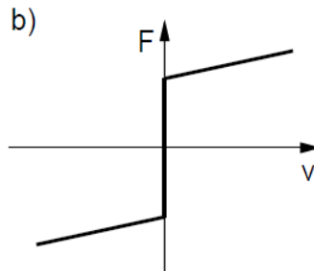


FIGURE 1 – Graphe d'un exemple de force de Coulomb (cf. [3])

Les articles abordent donc par la suite le modèle de Stribeck, qui est également le modèle choisi dans le projet *Dynaban* [2] - projet de fondement de celui sur lequel nous travaillons. Le modèle de Stribeck reprend le principe des frottements de Coulomb auxquels s'ajoutent des frottements visqueux. Dans la situation de *pré-glisement*, la force est modélisée de manière non-linéaire ; ceci explique le comportement rencontré dans la zone morte en 1.1.. Il existe diverses équations qui la régissent, bien que la plus commune soit l'équation (11) où la force est fonction de la vitesse  $v$ .  $v_S$  est appelée vitesse de Stribeck et  $\delta$  est un paramètre dépendant des matériaux étudiés. La FIGURE 2 permet de comprendre comment cette équation vient s'ajouter aux forces de Coulomb.

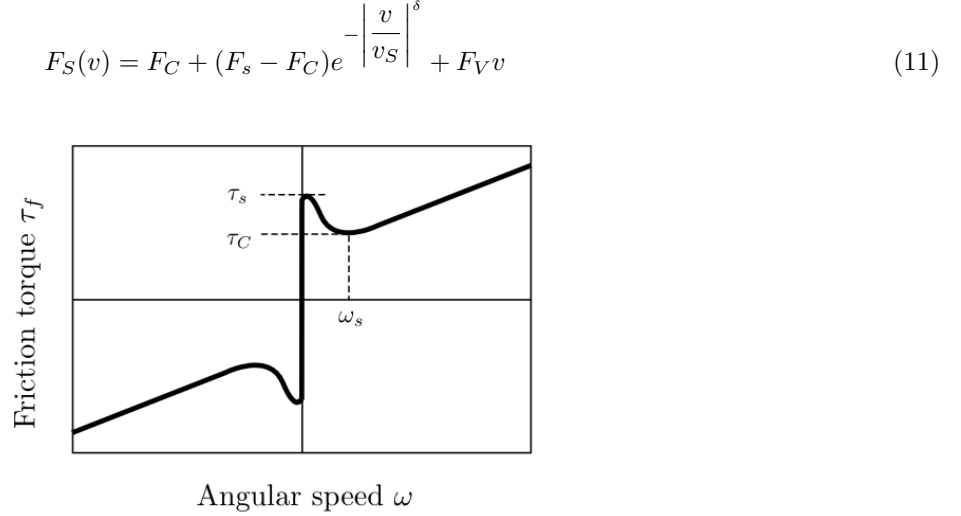


FIGURE 2 – Graphe d'un exemple de force de Stribeck (cf. [2])

Ce modèle est plus précis sur le comportement dans la zone morte mais ne permet pas de contrer la discontinuité rencontrée avec le modèle de Coulomb (bien que certains pallient à ce problème en joignant les deux extrémités à zéro par une droite de pente importante) et n'est toujours pas optimal pour la compensation de friction selon l'article de T. Tjahjowidodo. Ce dernier présente alors deux autres modèles : le modèle de LuGre et le modèle de glissement généralisé de Maxwell. Ces modèles prennent en considération les aspérités des solides au point de contact entre ces derniers, et les effets de relaxations sur ces dernières. Ils sont donc hautement dépendants des matériaux étudiés et les constantes liées à ces modèles sont à déterminer empiriquement.

Le modèle de LuGre propose d'utiliser une variable d'état des aspérités, dépendante d'une fonction modélisant les propriétés du frottement dans le régime de glissement, qui sera ensuite intégrée dans l'équation de la force. L'article « *Vers une industrialisation du modèle de frottement dynamique de LuGre.* » [8] détaille les équations de ce modèle. Ce modèle présente toutefois des problèmes d'adaptation à de potentielles hystérésis au niveau du zéro.

Le modèle GMS (*Generalized Maxwell-Slip*) va encore plus loin dans la considération de la relaxation : le solide est modélisé par un ensemble de  $N$  blocs élémentaires possédant chacun des caractéristiques d'aspérités propres. Ainsi, chaque bloc élémentaire peut être en glissement ou en état collé, même si le solide dans sa globalité est en dans un régime différent de celui du bloc considéré. La friction totale dépend alors du module de relaxation (12), où  $\eta_i$  sont les coefficients de viscosités et  $\tau_i$  les temps de relaxation de chacun des  $N$  blocs.

$$G(t) = \sum_{i=0}^N \frac{\eta_i}{\tau_i} e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (12)$$

[9] et [3] s'accordent pour dire que le modèle de Coulomb est loin d'être efficace pour le régime de pré-glisement et le passage au régime en glissement. Là où [3] et [2] acceptent le modèle de Stribeck, [9] va plus loin en montrant que ce modèle, bien que satisfaisant, reste moins efficace que le modèle de LuGre, et encore moins bon que le modèle GMS. L'article se propose, pour une entrée aléatoire au cours du temps, de mesurer le couple moteur effectif et de calculer avec les différents modèles le couple moteur théorique (dépendant des couples de frottements). Les résultats sont présentés sur la FIGURE 3 où l'on peut observer l'efficacité du GMS, non loin devant celle de LuGre. On y voit également les écarts des modèles de Stribeck dans la zone morte.

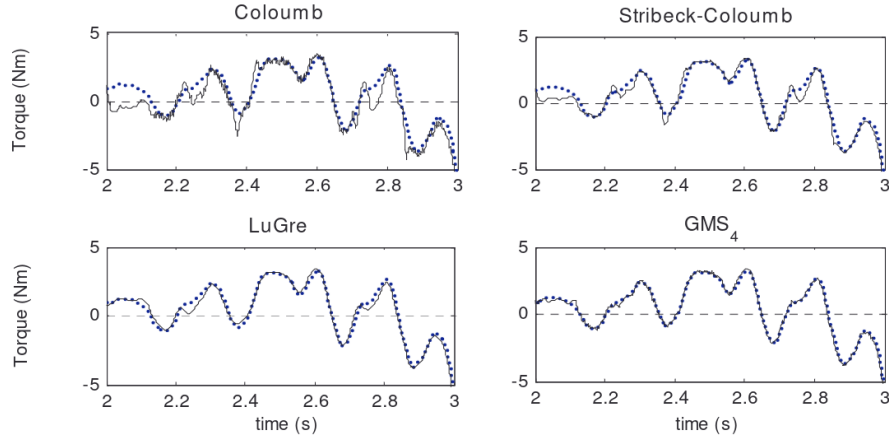


FIGURE 3 – Couples mesuré et estimé par différents models. Le couple mesuré est en pointillé, les lignes pleines sont les couples estimés.

### I.3. Identification empirique du moteur

Jusqu'ici, nous avons parlé de modèles formels permettant la représentation du moteur et des phénomènes qui le régissent. Mais comme mentionné avec les méthodes de LuGre et de GMS pour la modélisation de frottements [9], certaines caractéristiques des modèles sont intrinsèques au moteur étudié. Il en va de même pour certains paramètres internes au moteur, comme par exemple sa résistance interne. Les valeurs numériques de ces constantes ne peuvent être obtenues que par l'expérience ; nous discutons donc ici d'une série de protocoles mis en place dans différents papiers permettant l'identification du moteur.

Dans premier temps, il y a l'identification des paramètres du moteur. Un paramètre notoire est la résistance interne du moteur - qui intervient par exemple dans l'équation (1). Le test du rotor bloqué, utilisé dans [4] et [7], permet de déterminer ce paramètre. Ce paramètre dépend de la résistance interne du bobinage du stator du moteur ; [4] propose de faire le test de la résistance à vide (sans charge) pour calculer cette résistance.

Pour obtenir la résistance du moteur sans utiliser la résistance interne du bobinage du stator, il est possible de faire une régression linéaire comme suggéré dans [7] et mis en place dans [1]. Dans ce dernier article, une mesure du courant traversant le moteur et de la tension à ses bornes, pour différentes vitesses de rotation, permet d'obtenir par regression linéaire la résistance interne de l'armature du moteur ainsi que sa constante  $k_m$ , en s'appuyant sur l'équation (13).

$$\frac{e_a}{i_a} = \frac{\omega_m}{i_a} k_m + R_a \quad (13)$$

Ensuite, il y a l'identification des paramètres d'un modèle choisi pour le moteur. Par exemple, pour modéliser les force de frottements en action au sein du moteur par le GMS, il faut déterminer les coefficients de viscosités  $\eta_i$  et les temps de relaxation  $\tau_i$  de chacun des blocs considérés permettant d'obtenir le module de relaxation (12). Pour ce faire, [9] utilise la méthode de Nelder-Mead pour optimiser les paramètres des modèles étudiés.

De manière similaire, l'article [7] montre comment utiliser des constantes a priori connues (fournie par le constructeurs) pour les intégrer dans un modèle formel et résoudre les équations différentiels associées à ce modèle. L'article met notamment en oeuvre des simulations du moteur pour sa réponse à une impulsion en tension, ainsi que sa réponse en vitesse de rotation. On parle ici d'utilisation de « boîte grise » : on associe un modèle mathématique formel à des constantes relevées par l'expérience pour identifier un moteur.

Certaines constantes de modèles se relèvent purement par l'expérience, sans optimisation quelconque, comme c'est le cas du coefficient de frottements statiques de Coulomb. Dans [3], ce coefficient est mesuré en augmentant petit à petit la tension appliquée au moteur et mesurant la vitesse de rotation de ce dernier. Le coefficient est identifiable dans le changement de régime collé à glissé.

# II

## APPLICATION DU MODÈLE

Dans cette seconde partie, nous mettons en lumière l'intérêt des modèles précédemment introduits. Nous traitons notamment de l'asservissement par contrôleur PID et *feed-forward*. Puis, nous étudions le contrôle en couple de moteurs commandés en position.

### II.1. PID et Feedforward

Un composant commun dans les projets de mécatronique afin d'améliorer les performances d'asservissement est le régulateur PID, c'est-à-dire un régulateur en boucle fermée utilisant un système de *feedback* afin de mesurer et corriger les erreurs entre la position désirée par le système et la position mesurée. Il est notamment mentionné dans [10] dont nous reparlerons dans la sous-partie suivante. Le régulateur PID est formé de 3 composantes (équation 14) :

- **La partie proportionnelle** ( $P$ ) est responsable de corriger l'erreur de manière proportionnelle ; plus gros le coefficient  $P$  est, plus la correction va être grande.
- **La partie intégrale** ( $I$ ) est en charge de corriger l'erreur toujours présente après application de la composante proportionnelle en intégrant l'erreur accumulée en fonction du temps.
- **La partie dérivation** ( $D$ ) est présente afin de calculer la tendance de l'erreur et d'anticiper les erreurs futures.

$$u = K_p + K_i \int e dt + K_d \frac{di}{dt} \quad (14)$$

Le régulateur PID peut être combiné à une boucle *feed-forward* pour améliorer les performances du système [2] (figures 4 et 5). La boucle de commande utilise la vitesse du moteur, qui est calculée à partir du modèle et non mesurée par les encodeurs rotatifs des moteurs, comme élément alimentant le mécanisme de *feed-forward*. Initialement, l'équipe de recherche autrice de l'article comptait utiliser la mesure du courant depuis le servomoteur afin d'alimenter le mécanisme de *feed-forward*, mais celle-ci s'est avérée trop bruitée pour être exploitée.

Une fois la commande du système estimée et corrigée par le mécanisme de *feed-forward*, le modèle permet d'estimer le couple moteur et le couple de frottement à partir de la vitesse et de la tension appliquée aux bornes du moteur. Malgré les bons résultats, l'article souligne que le modèle utilise la vitesse moyenne du moteur là où il nécessiterait la vitesse instantanée à un moment donné et que des algorithmes utilisant le développement de Taylor ou bien le filtre de Kalman seraient en mesure d'améliorer l'estimation de la vitesse.

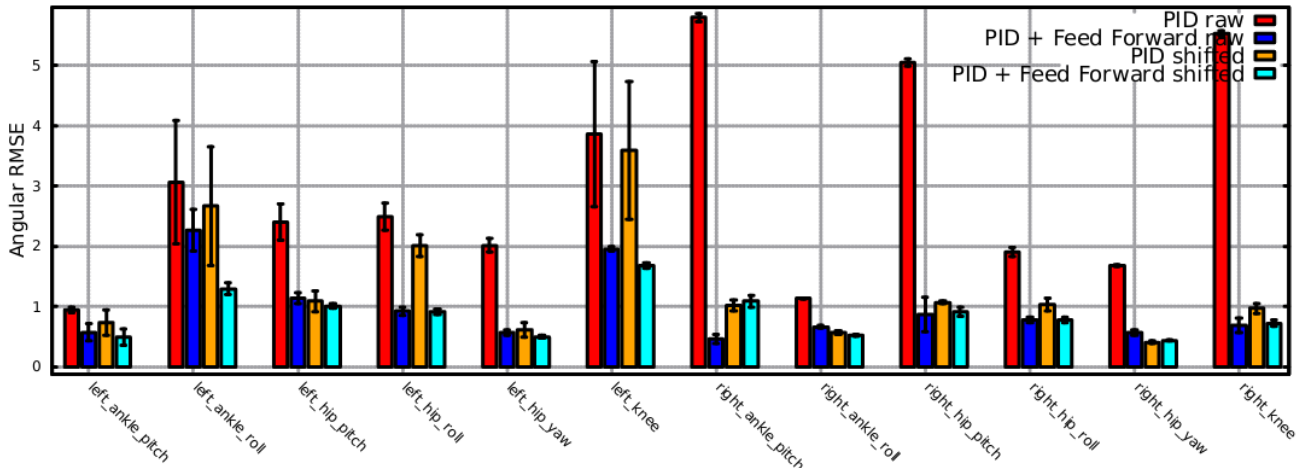


FIGURE 4 – Erreur quadratique moyenne (en degrés) (et écarts types) pour chaque DoF et stratégie de contrôle, avec et sans décalage temporel (Source [2])



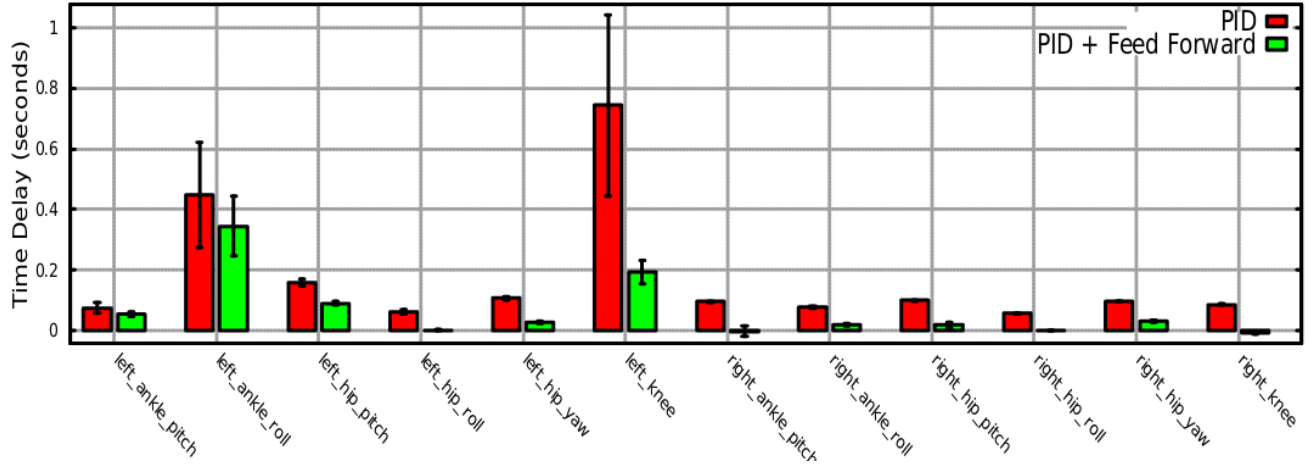


FIGURE 5 – Délais (et écart-type) pour chaque DoF et stratégie de contrôle (Source [2])

## II.2. Contrôle en couple de moteurs commandés en position

Aujourd'hui, l'énorme majorité des robots sont contrôlés en position par souci de simplicité, le principe du PID permettant d'obtenir des résultats satisfaisants. Cette approche, bien que largement répandue, présente des limitations dans la gestion des interactions homme-machine imprévisibles, notamment dans les applications impliquant des robots humanoïdes. Ces systèmes ont vocation à être utilisés dans des situations non-déterministes où une réponse adaptative est nécessaire. Dans ce contexte, Yoshikawa et Khatib (2009) [10] introduisent un concept novateur, le "Torque Transformer", conçu pour permettre un contrôle en couple sur des robots traditionnellement contrôlés en position. Cette approche révolutionne le contrôle robotique en offrant une plus grande flexibilité et conformité, essentielles pour les interactions humain-robot.

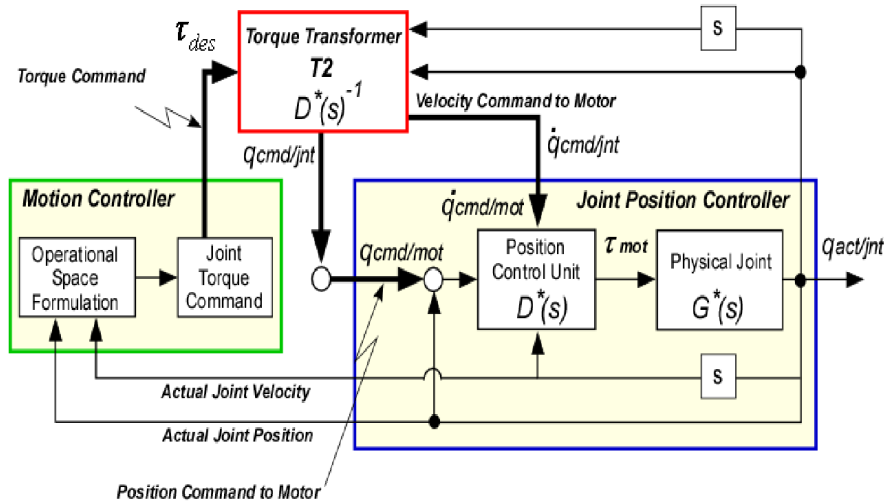


FIGURE 6 – Framework du Torque Control System

Dans un robot, chaque moteur a généralement son propre contrôleur intégré, qui gère la position, la vitesse et le courant du moteur pour exécuter les mouvements. Le framework en FIGURE 6 représente le système de contrôle en couple d'un moteur asservi en position. On y retrouve le contrôleur de mouvement (« *Motion Controller* ») qui opère au niveau logiciel de l'application, soit la couche la plus haute de notre architecture. C'est par ce biais qu'est produite la commande en couple à envoyer au moteur.

Cependant, ce dernier étant asservi en position, la commande générée est préalablement traitée par le transformateur de couple (« *Torque Transformer* »). Il s'agit d'un modèle inverse du contrôleur interne au moteur qui peut prédire et inverser les actions de celui-ci. En effet, le système utilise des boucles de rétroaction pour maintenir la position et la vitesse du moteur, ce qui interfère avec la commande de couple directe. Le « torque transformer » va donc permettre d'ignorer la commande en position (soit en donnant la position actuelle ou en mettant le gain de la position à 0) puis de convertir une commande en couple en une commande en vitesse instantanée.

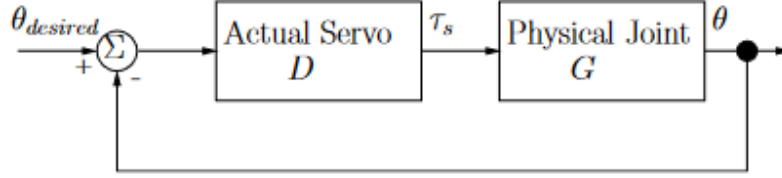


FIGURE 7 – Diagramme en blocs d'un robot commandé en position. Avec  $G$  l'articulation physique,  $D$  le contrôleur,  $\tau_s$  le couple d'entrée,  $\theta$  l'angle de l'articulation, et  $\theta_{desired}$  l'angle

Pour convertir cette information, Oussama Khatib, Peter Thaulad, Taizo Yoshikawa, et Jaeheung Park [6] proposent de représenter la boucle de rétroaction de la FIGURE 7 pour ajuster la position par la fonction de transfert  $T(s)$  décrite par (15).

$$T(s) = \theta(s)/\theta_{desired}(s) \quad (15)$$

Ainsi, on peut calculer le couple effectif par (16) :

$$\begin{aligned} \tau_s(s) &= D(s)(\theta_{desired}(s) - \theta(s)) \\ &= D(s)\theta_{desired}(s)(1 - T(s)). \end{aligned} \quad (16)$$

Dans les cas où les effets non-linéaires au niveau de l'articulation sont négligeable, on peut estimer que les deux fonctions de transferts  $G$  et  $D$  sont linéaires. L'équation (16) permet de déterminer la position  $\theta_{desired}$  à donner en entrée pour obtenir le couple souhaité  $\tau_{desired}$ . À l'inverse, l'équation (17) montre comment une position en entrée influe sur le couple produit en sortie sur un robot asservi en position.

$$\begin{aligned} \theta_{desired}(s) &= \frac{\tau_{des}(s)}{D(s)} + \theta(s) \\ &= \frac{\tau_{des}(s)}{D(s)(1 - T(s))}. \end{aligned} \quad (17)$$

Cependant dans le cas où les effets non-linéaires ne peuvent pas être négligés, le couple effectif  $\tau_{eff}$  au niveau de l'articulation diffère du couple  $\tau_s$  sortant du contrôleur  $D$ . Dans ce cas, le couple,  $\tau_{eff}$ , peut être considéré comme associé à la partie linéaire du système dynamique décrit dans l'équation suivante (18) :

$$\tau_s = \tau_{eff} + n(\theta, \dot{\theta}). \quad (18)$$

La fonction de transfert de  $\tau_{eff}$  à  $\theta$  d'un système idéal est donnée par (19) :

$$G^*(s) = \frac{1}{I_{eff}s^2 + b_{eff}s}. \quad (19)$$

Considérant la fonction de transfert en boucle fermée  $T(s)$  et le modèle de système idéal  $G^*(s)$ , le contrôleur effectif peut être calculé comme suit :

$$D^*(s) = \frac{T(s)}{G^*(s) - T(s)G^*(s)}. \quad (20)$$

On définit maintenant comment le couple effectif,  $\tau_{\text{eff}}$ , est relié à l'erreur de position (21) :

$$\tau_{\text{eff}} = D^*(s)(\theta_{\text{desired}} - \theta). \quad (21)$$

Pour générer un couple désiré,  $\tau_{\text{des}}$ , sur l'articulation, l'entrée de position,  $\theta_{\text{desired}}$ , est alors définie comme (22) :

$$\begin{aligned} \theta_{\text{desired}} &= \frac{\tau_{\text{des}}}{D^*(s)} + \theta \\ &= \frac{\tau_{\text{des}}}{D^*(s)(1 - T'(s))}. \end{aligned} \quad (22)$$

Après cette conversion, la commande de vitesse instantanée est transmise au contrôleur intégré (« *Position Control Unit* »). Ce contrôleur, travaillant habituellement avec des boucles de rétroaction pour la position et la vitesse, reçoit désormais une commande qui reflète directement la demande de couple, tout en étant décrite sous une forme qu'il peut traiter efficacement. Ainsi, même si le moteur et son contrôleur sont conçus pour répondre à des commandes de position, ils peuvent maintenant réagir de manière appropriée à des commandes de couple grâce à l'intervention du « Torque Transformer ».

Le Torque Transformer apporte des avantages significatifs dans le domaine de la robotique humanoïde. Il permet un contrôle flexible, essentiel pour une interaction sûre et naturelle dans des environnements dynamiques. Cette technologie, mise en place sur le robot humanoïde ASIMO, a montré une capacité améliorée à compenser le couple de gravité et à maintenir une interaction physique sécurisée avec les humains. De plus, l'intégration de ce système sur des robots existants ne requiert pas de modifications matérielles importantes, rendant son adoption plus accessible.

# III

## SYNTHÈSE ET TRAVAUX FUTURS

Dans cet état de l'art, nous avons abordé dans un premier temps les équations existantes permettant la modélisation d'un moteur à courant continu. Nous nous sommes penchés plus en détail sur quatre modèles différents permettant la modélisation des frottements au sein du moteur. Nous nous sommes également intéressés à l'identification des constantes de ces modèles par l'expérience.

Puis, nous avons mis en lumière comment nous pouvions nous servir de ces modèles formels pour faire de la commande en couple sur un servomoteur, notamment en passant par des méthodes d'asservissements comme le PID et le *feedforward*. Nous avons aussi mis en avant la possibilité de « by-passer » le contrôle en position de certains moteurs par un contrôle en couple de manière purement logiciel.

Dans un futur immédiat, nous allons reprendre les travaux menés sur le firmware *Dynaban* [2]. Il tire notamment parti du modèle de moteur à courant continu abordé en I.1., ainsi que du modèle de frottements de Stribeck présenté en I.2.. Il met également en place la méthode du feedforward détaillée en II.1..

En complément de l'existant, nous nous fixons comme premier objectif d'identifier les différents paramètres du servomoteur MX-64 afin de pouvoir le commander en couple. Une fois ces paramètres obtenus, ils seront implémentés dans notre propre version du firmware *Dynaban*, qui sera open-source (le *Dynaban* d'origine l'est déjà). Une piste d'amélioration qui sera possiblement explorée serait de passer au modèle de frottements de LuGre voire, au GMS, dont l'efficacité a été prouvée être plus grande que celle du modèle de Stribeck, actuellement en usage dans *Dynaban*.

L'objectif principal est d'utiliser les modèles et ressources présentées dans le présent document afin d'implémenter un doigt antigravité - un doigt à un moteur qui contre l'effet de la gravité s'appliquant sur une charge éventuellement attachée à ce dernier. À terme, nous aimerions implémenter un bras antigravité à deux moteurs et énoncer d'éventuelles pistes pour une implémentation à un nombre de moteurs supérieurs à 2.

## RÉFÉRENCES

- [1] Erik CHEEVER. *System Identification for a DC motor*. URL : <https://www.sccs.swarthmore.edu/users/06/adem/engin/e58/lab2/>.
- [2] Rémi FABRE et al. “Dynaban, an Open-Source Alternative Firmware for Dynamixel Servo-Motors”. In : *RoboCup 2016 : Robot World Cup XX*. Sous la dir. de Sven BEHNKE et al. T. 9776. Series Title : Lecture Notes in Computer Science. Cham : Springer International Publishing, 2017, p. 169-177. ISBN : 978-3-319-68791-9 978-3-319-68792-6. DOI : [10.1007/978-3-319-68792-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68792-6_14). URL : [https://link.springer.com/10.1007/978-3-319-68792-6\\_14](https://link.springer.com/10.1007/978-3-319-68792-6_14) (visité le 19/10/2023).
- [3] Michal Kelemen IVAN VIRGALA. “DC Motor, Friction, Identification, Stribeck Effect”. In : *International Journal of Mechanics and Applications* (2013).
- [4] Sinisa JURKOVIC. “INDUCTION MOTOR\* PARAMETERS EXTRACTION”. In : (). URL : <http://web.mit.edu/kirtley/binlustuff/literature/electric%20machine/motor-parameters.pdf>.
- [5] Tolgay KARA et İlyas EKER. “Nonlinear modeling and identification of a DC motor for bidirectional operation with real time experiments”. In : *Energy Conversion and Management* 45.7 (mai 2004), p. 1087-1106. ISSN : 01968904. DOI : [10.1016/j.enconman.2003.08.005](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.08.005). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890403002139> (visité le 19/11/2023).
- [6] Oussama KHATIB et al. “Torque-position transformer for task control of position controlled robots”. In : *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Pasadena, CA, USA : IEEE, mai 2008, p. 1729-1734. ISBN : 978-1-4244-1646-2. DOI : [10.1109/ROBOT.2008.4543450](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543450). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4543450/> (visité le 09/11/2023).
- [7] David Fernando Zambrano ROMERO, Alejandro Salazar VELEZ et Juan Bernardo GOMEZ-MENDOZA. “Non-linear Grey-Box Models Applied to DC Motor Identification”. In : *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*. 2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC). Medellín, Colombia : IEEE, oct. 2019, p. 1-5. ISBN : 978-1-5386-6962-4. DOI : [10.1109/CCAC.2019.8921181](https://doi.org/10.1109/CCAC.2019.8921181). URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8921181/> (visité le 24/11/2023).
- [8] Rémi THANWERDAS et al. *Vers une industrialisation du modèle de frottement dynamique de LuGre. Application à des essais de glissement en condition de frottement sec*. 31 mars 2015.
- [9] Tegoeh TJAHJOWIDODO, Farid AL-BENDER et H. BRUSSEL. “Friction identification and compensation in a DC motor”. In : *IFAC Proceedings Volumes* 32 (4 juill. 2005). DOI : [10.3182/20050703-6-CZ-1902.00093](https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.00093).
- [10] Taizo YOSHIKAWA et Oussama KHATIB. “Compliant humanoid robot control by the torque transformer”. In : *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009). St. Louis, MO, USA : IEEE, oct. 2009, p. 3011-3018. ISBN : 978-1-4244-3803-7. DOI : [10.1109/IROS.2009.5353907](https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5353907). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/5353907/> (visité le 09/11/2023).