



HAL
open science

Modélisation et commande d'un robot à deux bras pour la saisie de boîtes en carton dans les entrepôts logistiques

Khairidine Benali, Jean-François Brethé, François Guérin

► To cite this version:

Khairidine Benali, Jean-François Brethé, François Guérin. Modélisation et commande d'un robot à deux bras pour la saisie de boîtes en carton dans les entrepôts logistiques. Cahiers de la logistique, 2024, La robotisation dans les entrepôts logistiques (5). hal-04854387

HAL Id: hal-04854387

<https://normandie-univ.hal.science/hal-04854387v1>

Submitted on 23 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



**La robotisation dans
les entrepôts
logistiques**

**PÔLE INGÉNIEUR
LOGISTIQUE
LE HAVRE NORMANDIE**

**CAHIERS DE LA
LOGISTIQUE**



**CAHIERS DE LA
LOGISTIQUE
CL2024 – N° 05**

La robotisation dans les entrepôts logistiques

Décembre, 2024
Copyright © 2024, ISEL



La présente publication est protégée par le code de la propriété intellectuelle et plus précisément ses articles relatifs au respect du droit d’auteur.

Les auteurs demeurent seuls responsables du contenu de leur œuvre. Ils garantissent disposer des autorisations nécessaires de la part des tierces parties titulaires de droits sur des œuvres partiellement ou globalement reproduites. Les droits moraux et patrimoniaux sur l’œuvre demeurent attachés à leurs auteurs.

Afin de faciliter le partage et l’utilisation de leur création, les auteurs autorisent les utilisateurs à :

- Télécharger et imprimer une copie de la présente publication à des fins d’études, de recherche, de diffusion de la culture scientifique et de partage des connaissances ;
- Distribuer gratuitement et sans aucune contrepartie l’URL identifiant la publication.

La présente publication, et l’URL associée ne peuvent en aucun cas être distribuées ou utilisées dans le cadre d’une activité à but lucratif ou à des fins commerciales. Aucune modification du contenu de l’œuvre n’est autorisée.

MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN ROBOT À DEUX BRAS POUR LA SAISIE DE BOÎTES EN CARTON DANS LES ENTREPÔTS LOGISTIQUES

Khairidine BENALI¹, Jean-François BRETHER², François GUERIN²

¹École d'Informatique, Université de Nottingham
Wollaton Rd, Lenton, Nottingham NG8 1BB

² GREAH, Université Le Havre Normandie
75, Rue Bellot, 76058 Le Havre Cedex (France)

RESUME

Dans les entrepôts logistiques, la manipulation robotisée des boîtes en cartons, composants basiques du conditionnement en palette, est effectuée presque exclusivement par un bras robotique anthropomorphe muni d'un préhenseur de type pince ou ventouse. Or les opérateurs humains qui accomplissent ces tâches utilisent généralement leurs deux bras et sont beaucoup plus polyvalents pour saisir la large variété de colis présents. Dans ce cadre, une méthode innovante de saisie robotisée de colis est proposée à partir d'un torse humanoïde (CROM) équipé de deux bras cobotiques (UR10). La solution vise à reproduire la dextérité de manipulation d'un opérateur humain. Les phases de conception et modélisation sont détaillées ainsi que la description d'une loi de commande innovante optimisée de type position-Force/Position.

MOTS CLÉS: Logistique, Manutention, Torse humanoïde, Cobotique, Commande en Force/Position.

ABSTRACT

In logistics warehouses, the robotic handling of cardboard boxes, the basic components of pallet packaging, is carried out almost exclusively by one anthropomorphic robotic arm fitted with gripper or suction cups. However, the human operators who perform these tasks generally use their two arms and are much more versatile when it comes to gripping the wide variety of packages present. In this context, an innovative method of robotised parcel gripping is proposed based on a humanoid torso (CROM) equipped with two cobotic arms (UR10). The solution aims to reproduce the handling dexterity of a human operator. The design and modelling phases are detailed, as is the description of an innovative optimised position-Force/Position control law.

KEYWORDS: Logistics, Handling, Humanoid torso, Cobotics, Force/Position control.

1. Introduction

Aujourd'hui les opérations de manutention dans les entrepôts logistiques sont encore majoritairement effectuées par des opérateurs humains. Or la pénurie de ressources humaines et la pénibilité de ces tâches TMS (Troubles Musculo-Squelettiques) amènent à envisager la robotisation de ces opérations dans le cadre plus général de l'évolution de la logistique vers l'industrie 4.0. Cependant du fait de la grande variété des textures, des géométries et des masses des objets stockés en entrepôt, leur manutention par des robots est beaucoup plus complexe que sur une chaîne d'assemblage traditionnelle où les préhenseurs sont conçus spécifiquement pour un objet. Si on restreint l'analyse au cas de la dépalettisation de cartons de taille variable, la solution classique du bras anthropomorphe est limitée par les contraintes du préhenseur (largeur d'ouverture de la pince, surface couverte par les ventouses, etc). Il s'avère en pratique que les opérateurs humains n'ont aucune difficulté à saisir des cartons de taille variable du fait qu'ils utilisent leur deux bras. De ce fait, l'utilisation d'un robot humanoïde semble une solution prometteuse. Il faut cependant au préalable résoudre un certain nombre de verrous scientifiques : entre autres, la reconnaissance des géométries et la localisation des cartons grâce à des techniques d'analyse d'images ou de deep learning ou la mise en œuvre d'une commande avancée permettant au robot de fonctionner dans des environnements dynamiques et imprévisibles.

Concernant la commande avancée, des recherches antérieures, telles que Park and Lee (2016), Erhart et al. (2013) et Erhart and Hirche (2015), ont exploré la manipulation à deux bras, en se concentrant sur la commande en espace de tâches en mode coopératif étendu et en traitant des erreurs cinématiques dans les chaînes cinématiques fermées. Dans Pliego-Jimenez and Arteaga-Perez (2017) sont décrites des lois de commande hybrides adaptatives Force/Position, et dans Lin (2018), des lois de commande contraintes imposent le contact et le frottement avec un comportement d'impédance cartésienne. Des stratégies de planification de mouvement coordonnées pour des tâches complexes qui ne peuvent pas être exécutées par un seul bras manipulateur ont été détaillées dans Salehian et al. (2016). Nurkan Yagiz and Arslan (2010), Yim et al. (1999), Liu (2000) ont étudié une commande par mode glissant pour les systèmes à deux bras, nécessitant la prise en compte à la fois des paramètres dynamiques des robots et des objets qu'ils manipulent. Les contributions d'Almeida and Lopes (1999) sur la commande Force-Impédance ont aussi montré tout leur intérêt.

Nos travaux se focalisent essentiellement sur la synthèse d'une commande optimale pour saisir un carton par les faces latérales en maintenant une force minimale pour éviter le glissement et la chute de l'objet et sans dépasser une force trop forte risquant de détériorer l'objet. La contribution majeure de cet article est la proposition d'un schéma de commande innovant qui combine des méthodes maître/esclave et hybrides force-position. Tout d'abord une présentation et une modélisation synthétique du dispositif utilisé est effectuée. Elle est suivie d'une description détaillée de la commande innovante et d'une comparaison aux approches classiques.

2. Présentation et modélisation du manipulateur à deux bras

2.1 Description du système

Notre manipulateur à double bras est constitué par l'assemblage de deux bras cobotiques Universal Robots UR10 (6 degrés de liberté et 10 kg de charge utile) sur un torse CROM 1-DOF



FIGURE 1 – Le robot manipulateur à double bras CROM

(Figure 1). Le CROM est équipé d'une tête munie d'une caméra 3D XTION de type Pan-Tilt (moteurs Dynamixel Pro H42). Les bras UR10 sont commandés à une fréquence de 125 Hz par le biais d'une interface utilisateur, ou par des commandes de script et par le niveau C-API. Les commandes sont en vitesses articulaires ou portent sur une combinaison de position articulaire, de vitesse articulaire et d'accélération articulaire. L'extrémité de chaque bras est équipée d'un capteur 6-axes de force et de couple FT 150 Robotiq. Les composants de notre système sont coordonnés par ROS (Robot Operating System), qui fournit des services de transmission de messages inter-processus (IPC) au sein d'un réseau.

2.2 Modélisation cinématique du système coopératif

La modélisation cinématique du système coopératif composé de deux bras manipulateurs UR10 et du torse CROM est décrite en détail dans Benali et al. (2018). Nous rappelons les points essentiels dans ce paragraphe. La commande prend en compte la contrainte unilatérale selon laquelle les bras peuvent pousser mais ne peuvent pas tirer l'objet saisi. Nous supposons en outre que le torse reste fixe et par conséquent le schéma de commande n'intègre pas à ce stade la rotation du torse.

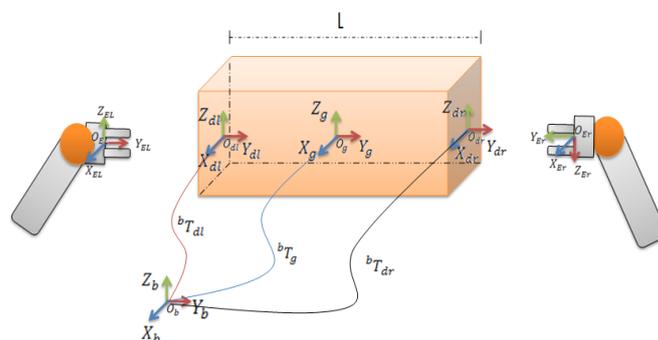


FIGURE 2 – Schéma des repères pour le système robotique à double bras.

La matrice de préhension Gr d'un système manipulateur à deux bras représente la relation entre les vitesses des objets et celles des effecteurs finaux, décrivant comment les mouvements des bras influencent les mouvements de l'objet manipulé.

Le système robotique comporte deux bras manipulateurs, ce qui signifie que la matrice de préhension est formée des composants de la matrice de préhension de chaque bras.

L'équation $\dot{x}_i = Gr_i \dot{x}_o$ lie la vitesse \dot{x}_o de l'objet à la vitesse \dot{x}_i du bras i .

3. Modélisation de la commande du système coopératif

Nous rappelons maintenant les concepts de commande en position et de commande en force qui sont au fondement des commandes hybrides Force/Position. Le détail des équations figure dans Benali et al. (2018).

3.1 Commande en position ou vitesse

Les erreurs de position et d'orientation (e_p, e_r) sont les variables d'entrée de notre boucle d'asservissement :

$$e_p = p_d - p \quad \text{et} \quad e_r = \xi(R_d R^T) \quad (1)$$

La loi de commande proportionnelle calcule les vitesses de chaque manipulateur en fonction des erreurs de position et d'orientation, en utilisant les gains de réaction K_i et les constantes spécifiques au manipulateur Gr_i :

$$v_i = Gr_i K_i \begin{bmatrix} e_p \\ e_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

Les vitesses dans l'espace articulaire s'obtiennent à partir des vitesses cartésiennes v_i grâce au pseudo-inverse de la matrice jacobienne J_a :

$$\dot{q}_i = J_a^T (J_a J_a^T)^{-1} v_i \quad (3)$$

3.2 Commande en Force

Nous avons intégré deux capteurs d'efforts 6 axes à l'extrémité des deux bras. La loi de commande en effort vise à assurer une force donnée et se traduit par l'ajout d'une vitesse supplémentaire v_f résultant de l'écart e_f entre la force de consigne et la force mesurée et d'un gain de réaction K_f :

$$v_f = K_f e_f \quad (4)$$

3.3 Commande en Force/Position

La loi de commande hybride Force/Position assure un compromis entre les consignes à respecter au niveau de la trajectoire à suivre et de la force à exercer. Elle comprend donc un premier terme correctif pour la position et un deuxième terme pour la force. L'agrégation se fait au final en terme de vitesses cartésiennes et est traduite ensuite en vitesses articulaires suivant l'équation :

$$\dot{q}_i = \mathbf{N} (J_a^T (J_a J_a^T)^{-1} Gr_i K_i e_i) + (\mathbf{I} - \mathbf{N}) (J_F^T (J_F J_F^T)^{-1} K_f e_f) \quad (5)$$

4. Comparaison de deux commandes

Dans cette section, nous étudions deux architectures hybrides de commande. La première est l'architecture Force/Position-Force/Position, qui est la plus couramment rencontrée dans la littérature. La seconde est l'architecture Force/Position-Position que nous proposons d'introduire. Dans cette optique, nous allons optimiser les paramètres des commandes ce qui nécessite un travail de modélisation dynamique. Dans ce but, nous introduisons la notion de compliance sur les faces latérales du carton avec les raideurs k_1 et k_2 comme indiqué sur la Figure 3.

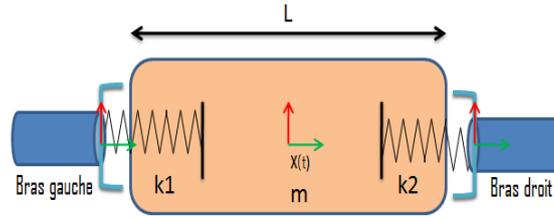


FIGURE 3 – Modélisation de la compliance de l'objet et des deux bras manipulateurs

Nous considérons que le bras gauche (indice L=left) est contrôlé en utilisant une commande en Position, tandis que le bras droit (indice R=right) est contrôlé en utilisant une commande en Force/Position et nous obtenons les équations suivantes :

$$\dot{x}_L = K_L(x_L^{th}(t) - x_L(t)) \quad (6)$$

$$\dot{x}_R = K_R(x_R^{th}(t) - x_R(t)) + K_f(F(t) - F_0) \quad (7)$$

Nous fixons les notations suivantes :

- \dot{x}_R, \dot{x}_L représentent les vecteurs de vitesse du bras droit et gauche respectivement.
- $x_R^{th}(t), x_L^{th}(t), x^{th}(t)$ sont les positions désirées du bras droit et gauche, et du centre du carton.
- $x_R(t), x_L(t)$ représentent les positions mesurées sur les bras.
- $x(t)$ est la position du centre de gravité du carton.
- $F_R(t), F_L(t)$ représentent les forces exercées par le bras droit et le bras gauche sur le carton.
- F_0 est la force minimale à exercer pour éviter tout glissement.
- K_f, K_L, K_R sont les gains des lois de commande à ajuster.

Les positions des extrémités des bras droit et gauche sont définies comme suit :

$$x_L^{th}(t) = x^{th}(t) - \frac{L}{2} \text{ et } x_R^{th}(t) = x^{th}(t) + \frac{L}{2} \quad (8)$$

Pour simplifier, les forces sont supposées agir uniquement dans la direction (x) du repère de l'objet, d'où :

$$F_R(t) = -K_1(x(t) - \frac{L}{2} - x_L(t)) + F_0 \text{ et } F_L(t) = K_2(x(t) + \frac{L}{2} - x_R(t)) + F_0 \quad (9)$$

La force relative $F_r(t)$ imposée sur l'objet peut être décrite par la relation (10) :

$$F_r(t) = F_R(t) - F_L(t) \quad (10)$$

Ces expressions sont valides tant que les manipulateurs sont en contact avec l'objet ($F_L(t) \geq 0$ et $F_R(t) \leq 0$).

En appliquant le principe fondamental de la dynamique sur le carton, avec M la masse du carton, le modèle dynamique du système est le suivant :

$$M\ddot{x}(t) = (-K_1(x(t) - \frac{L}{2} - x_L(t)) + F_0) + (-K_2(x(t) + \frac{L}{2} - x_R(t)) - F_0) \quad (11)$$

$$M\ddot{x}(t) + (K_1 + K_2)x(t) + \frac{L}{2}(K_2 - K_1) - K_1x_L(t) - K_2x_R(t) = 0 \quad (12)$$

$$\dot{x}_L(t) = K_L(x^{th}(t) - \frac{L}{2} - x_L(t)) \quad (13)$$

$$\dot{x}_R(t) = K_R(x^{th}(t) + \frac{L}{2} - x_R(t)) + K_f(F_R(t) - F_0) \quad (14)$$

$$F_R(t) = K_2(x(t) + \frac{L}{2} - x_R(t)) + F_0 \quad (15)$$

Par conséquent, l'équation (16) peut être déduite à partir des équations (14) et (15) :

$$\dot{x}_R(t) = K_R(x^{th}(t) + \frac{L}{2} - x_R(t)) + K_f(K_2(x(t) + \frac{L}{2} - x_R(t))) \quad (16)$$

Les équations précédentes correspondent à un système différentiel linéaire à 4 équations, où le vecteur d'état est : $X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4]^t = [x_L(t) \ \dot{x}_R(t) \ x_L(t) \ x_R(t)]^t$; le vecteur d'entrée est : $U = [1 \ x^{th}(t)]^t$ et le vecteur de sortie est : $Y = [Y_1 \ Y_2 \ Y_3 \ Y_4]^t$

La représentation dans l'espace d'état devient : $\dot{X} = AX + BU$ et $Y = CX$ où :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_1+K_2}{M} & \frac{K_1}{M} & \frac{K_2}{M} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_L & 0 \\ 0 & K_2K_f & 0 & K_R + K_fK_2 \end{bmatrix} \text{ et } B = \begin{bmatrix} (K_1 - K_2)\frac{L}{M} & 0 \\ 0 & 0 \\ -K_L\frac{L}{2} & K_L \\ K_R\frac{L}{2} + K_fK_2\frac{L}{2} & K_R \end{bmatrix} \text{ et } C = I_4 \quad (17)$$

Pour une trajectoire imposée $x^{th}(t)$ et un F_0 fixé, on peut résoudre le système et en déduire $x(t)$, $x_L(t)$, $x_R(t)$ et $F_R(t)$.

En suivant la même procédure, nous pouvons déduire la représentation dans l'espace d'état pour l'architecture Force/Position-Force/Position. Seules les matrices A et B changent et deviennent :

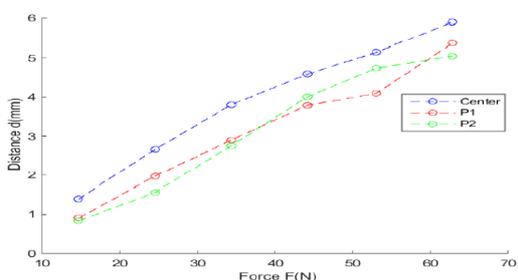
$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_1+K_2}{M} & \frac{K_1}{M} & \frac{K_2}{M} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_1K_{fl} & -K_{fl}K_1 - K_L & 0 \\ 0 & K_2K_{fr} & 0 & -(K_R + K_{fr}K_2) \end{bmatrix} \text{ et } B = \begin{bmatrix} (K_1 - K_2)\frac{L}{M} & 0 \\ 0 & 0 \\ -K_g\frac{L}{2} - K_{fg}K_1\frac{L}{2} & K_g \\ K_d\frac{L}{2} + K_{fd}K_2\frac{L}{2} & K_d \end{bmatrix} \quad (18)$$



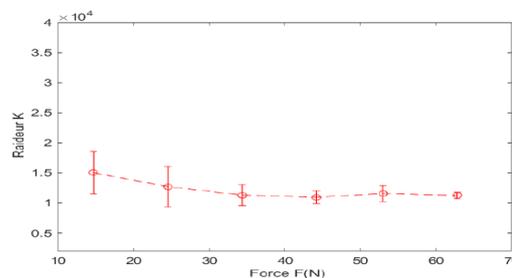
FIGURE 4 – Dispositif expérimental pour l’estimation de la raideur k

4.1 Estimation expérimentale de la compliance du carton

Pour optimiser la commande, il est nécessaire d’estimer expérimentalement la compliance $\frac{1}{k} = \frac{x}{F}$ du carton où F est la force appliquée au centre P de la face latérale du carton (en N) et x est la déflexion au point de contact (en m). Nous utilisons deux micromètres situés de part et d’autre d’une barre indéformable en contact ponctuel avec le centre du carton et nous ajoutons des masses additionnelles pour augmenter la force verticale et mesurer la déflexion correspondante (Figure 4). Une campagne d’essais permet de tracer les courbes affichées sur la Figure 5 où P1 (resp. P2) est un point de contact décalé de 2 cm vers l’arrière du centre de la face (resp. vers l’avant).



(a) Détermination expérimentale de la relation force/déflexion.



(b) Détermination expérimentale de la raideur au centre de la face latérale

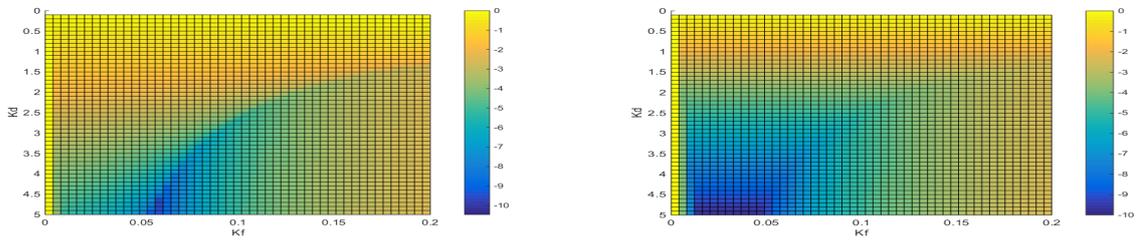
FIGURE 5 – Détermination expérimentale de la raideur du carton

La raideur obtenue expérimentalement a une valeur moyenne de $12000\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ avec une variabilité de $3000\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ due aux différences des matériaux et des contenus.

4.2 Optimisation des commandes

Pour optimiser les commandes, nous utilisons les valeurs moyennes expérimentales précédemment estimées pour les deux paramètres K_1 et K_2 et nous nous intéressons maintenant à déterminer les valeurs optimales des coefficients K_d et K_f . Dans cette optique, pour les deux types d’architectures de commande (Force/Position-Position et Force/Position-Force/Position), nous calculons les parties réelles des valeurs propres de la matrice d’état du système et les représentons sur les Figures 6a et 6b. Les valeurs propres ont toutes une partie réelle négative et

cela indique que la stabilité du système est bien assurée. Nous pouvons alors améliorer la robustesse de la commande en choisissant les parties des valeurs propres les plus négatives possible (zones bleues), ce qui permet d'optimiser les paramètres de nos commandes avant de pouvoir les comparer.



(a) Les valeurs propres de la matrice d'état (avec partie réelle négative) pour une architecture Force/Position-Force/Position

(b) Les valeurs propres de la matrice d'état (avec partie réelle négative) pour une architecture Force/Position-Position

FIGURE 6 – Les valeurs propres de la matrice d'état pour les deux architectures

Les paramètres K_d et K_f ayant été fixés, la commande Force/Position est appliquée sur le bras droit et la commande Position sur le bras gauche suivant le schéma général de la Figure 7.

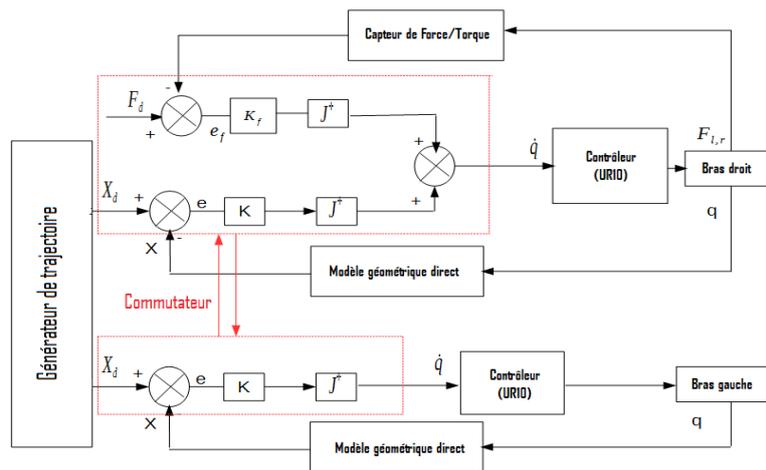
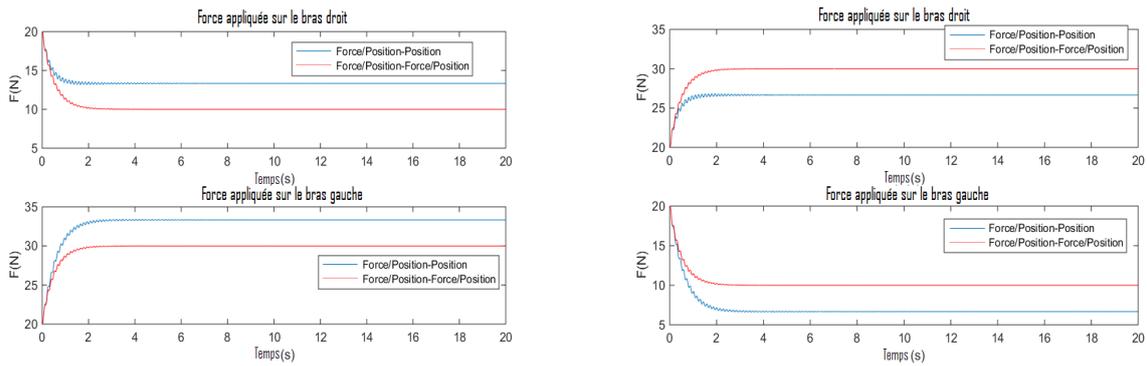


FIGURE 7 – Diagramme de commande du robot à double bras

5. Expérimentations et discussions

Nous comparons expérimentalement les performances des deux méthodes de commande : commande hybride Force/Position sur les deux bras ; commande en position sur un bras et commande en Force/Position sur l'autre bras. La trajectoire planifiée est un mouvement rectiligne avec une accélération constante donnée ($\pm 10m/s^2$) menant à une trajectoire $x^{th}(t) = \frac{1}{2}at^2$ et une force initiale appliquée de $F_0 = 20N$. Les performances sont évaluées par rapport à la force minimale $F(t)$ qui doit rester au-dessus de la valeur minimale F_0 qui évite le glissement du carton. Les forces sont mesurées et affichées sur la Figure 8.



(a) Forces exercées sur le carton ($a = 10m/s^2$)

(b) Forces exercées sur le carton ($a = -10m/s^2$)

FIGURE 8 – Forces exercées sur le carton par les bras droit et gauche

5.1 Architecture de Commande Hybride Force-Position sur les deux bras

Lorsque les deux bras sont commandés en Force/Position, dans le cas où le bras gauche avance et le bras droit recule ($a = 10m/s^2$), la force exercée par le bras droit diminue d'environ 10 N pour se stabiliser à 10 N, tandis que la force exercée par le bras gauche augmente d'environ 10 N pour se stabiliser à 30 N. Ce faisant, il y a un risque de glissement du carton sur la face latérale droite. Du fait que le schéma de commande est symétrique, les mêmes remarques s'appliquent pour une accélération négative ($a = -10m/s^2$) correspondant à un mouvement vers la gauche.

5.2 Architecture de Commande mixte Force/Position et position

Le bras gauche est commandée en position tandis que le bras droit est commandé en Force/Position. Lors d'un déplacement vers la droite, la force exercée par le bras gauche sur le carton est de 33 N tandis que le bras droit exerce une force de 13 N. Le bras gauche commandé en position "pousse" en quelque sorte le carton et le bras droit s'adapte pour garder un différentiel de force de 20 N. Par-contre, lors d'un déplacement vers la gauche, la force exercée par le bras gauche sur le carton est de 7 N tandis que le bras droit exerce une force de 27 N. Le bras gauche "se rétracte" vers la gauche et le bras droit s'adapte pour garder un différentiel de force de 20 N. Le premier enseignement est que cette commande est fortement dissymétrique. La deuxième conclusion est que l'on peut exploiter cette dissymétrie en commandant en position le bras qui se déplace dans la direction de l'accélération du carton. En procédant de cette manière, la force minimale exercée par le bras commandé en Force/Position est plus élevée que celle obtenue lorsque les deux bras sont commandés en Force/Position. Cependant cette méthode nécessite d'intégrer un processus de commutation de commande entre les bras en fonction du signe de l'accélération désirée pour le carton.

6. Conclusions

La saisie de cartons par les faces latérales en exerçant une pression par les deux bras d'un torse humanoïde utilise généralement une commande Force/Position sur les deux bras. Dans cet article, nous avons présenté une architecture de commande innovante, utilisant une commande en position pour le bras qui se déplace dans la direction de l'accélération positive souhaitée pour le carton et une commande en Force/Position pour l'autre bras. Afin de pouvoir comparer les deux méthodes, nous avons d'abord cherché à modéliser le système mécanique complet en prenant en

compte la compliance du carton. Nous avons mené une campagne d'expérimentation pour estimer la raideur du carton au point de contact et utilisé cette valeur pour optimiser les performances des deux modes de commande choisis. Nous avons ensuite comparé expérimentalement les deux modes de commande sur une trajectoire rectiligne avec accélération constante et mesuré les valeurs des forces exercées par les bras sur les faces latérales du carton. Les résultats montrent que la nouvelle commande proposée (Force/Position-position) permet d'assurer une meilleure adhérence et d'éviter les glissements du fait que la force minimale exercée est supérieure à celle d'une commande symétrique Force/Position. Cette nouvelle commande peut donc être mise en œuvre avec succès mais nécessite de bien gérer la commutation de commande entre les deux bras car le bras qui se déplace dans la direction de l'accélération positive doit être commandé en position. Cette commutation de commande peut être réalisée par une fonction non-linéaire d'hystérésis.

7. Remerciements

Les auteurs remercient l'Université le Havre Normandie, la Région Haute-Normandie et le FEDER (Fonds Européen de Développement Régional) qui ont financé les travaux dans le cadre du projet XTERM : Usine du Futur.

Références

- Almeida, P. A. F. and Lopes, A. (1999). Force-impedance control : a new control strategy of robotic manipulators.
- Benali, K., Brethé, J.-F., Guérin, F., and Gorka, M. (2018). Dual arm robot manipulator for grasping boxes of different dimensions in a logistics warehouse. In *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pages 147–152, Lyon, France.
- Erhart, S. and Hirche, S. (2015). Internal force analysis and load distribution for cooperative multi-robot manipulation. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(5) :1238–1243.
- Erhart, S., Sieber, D., and Hirche, S. (2013). An impedance-based control architecture for multi-robot cooperative dual-arm mobile manipulation. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 315–322, Tokyo, Japan.
- Lin, H.-C. e. a. (2018). A projected inverse dynamics approach for multi-arm cartesian impedance control. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 5421–5428, Brisbane, Australia.
- Liu, A.-M. J. (2000). Robust control of planar dual-arm cooperative manipulators. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*.
- Nurkan Yagiz, Y. H. and Arslan, Y. Z. (2010). Load transportation by dual arm robot using sliding mode control. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(5) :1177–1184.
- Park, H. A. and Lee, C. S. G. (2016). Dual-arm coordinated-motion task specification and performance evaluation. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 929–936, Daejeon, South Korea.

- Pliego-Jimenez, J. and Arteaga-Perez, M. (2017). On the adaptive control of cooperative robots with time-variant holonomic constraints. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 31(8) :1217–1231.
- Yim, W. R. W., Selvarajan, M., and Wells (1999). Sliding mode cooperative motion control of dual arm manipulators. *Artif Life Robotics*, 3 :166–169.

Biographie des auteurs



Khairidine Benali est un chercheur en robotique, dont les spécialités englobent la robotique médicale, la collaboration entre robots et l'intelligence artificielle appliquée à ce domaine. Il a obtenu son doctorat en sciences robotiques à l'Université de Normandie Le Havre en 2019, après avoir suivi ses études de Master à l'Université de Montpellier. Actuellement, il exerce en tant que chercheur en robotique et intelligence artificielle à l'Université de Nottingham.



Jean-François Brethé est Professeur des Universités en robotique à l'Université Le Havre Normandie, Institut Supérieur d'Etudes Logistiques (ISEL) et membre du GREAH (Groupe de Recherche en Electrotechnique et Automatique du Havre). Ses travaux de recherche portent initialement sur la modélisation, la conception et l'étude des performances en précision des robots manipulateurs industriels, puis se focalisent aujourd'hui sur les verrous scientifiques posés par l'introduction de cobots dans les entrepôts logistiques (préparation de commandes robotisée par robot manipulateur mobile, saisie de colis de taille variable par torse humanoïde).



Dr François Guérin est Agrégé de Génie Electrique-Electronique (1995) et Docteur de l'Université Le Havre Normandie en Automatique et Robotique (2004). Il a obtenu son Habilitation à Diriger des Recherches (2015) et travaille comme Maître de Conférences à l'Université Le Havre Normandie, au sein de l'Institut Supérieur d'Etudes Logistiques (ISEL) et du Groupe de Recherche en Electrotechnique et Automatique (GREAH). Ses enseignements portent sur l'Électronique (IoT), l'Automatique et la Robotique et ses travaux de recherche s'intéressent à la Commande Avancée des Systèmes, appliquée à la Robotique Mobile Terrestre et Aérienne. En 2021, il a créé au Havre (76), le Centre d'Innovation Drones de Normandie (CIDN) et a intégré en 2022, la Réserve Citoyenne de L'Armée de Terre auprès du 61eme Régiment d'Artillerie basé à Chaumont (52).