

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
29 juin 2017 (29.06.2017)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2017/108449 A1

- (51) Classification internationale des brevets :
B25J 9/00 (2006.01) **G05B 11/36** (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2016/080435
- (22) Date de dépôt international :
9 décembre 2016 (09.12.2016)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1563069 22 décembre 2015 (22.12.2015) FR
- (71) Déposant : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES [FR/FR]; 25 rue Leblanc - Bâtiment le Ponant D, 75015 Paris (FR).
- (72) Inventeurs : ABROUG, Neil; 29 rue Nicolas Chorier, 38000 Grenoble (FR). LAMY, Xavier; 202 avenue de Verdun, 92130 Issy-les-Moulineaux (FR).
- (74) Mandataires : LAVIALLE, Bruno et al.; Cabinet Boettcher, 16 rue Médéric, 75017 Paris (FR).

- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

(54) Title : METHOD FOR CONTROLLING AN ACTUATOR OF AN ARTICULATED SEGMENT OF A COLLABORATIVE ROBOT WITH FORCE AMPLIFICATION

(54) Titre : PROCEDE DE COMMANDE D'UN ACTIONNEUR D'UN SEGMENT ARTICULE D'UN ROBOT COLLABORATIF A AMPLIFICATION D'EFFORT

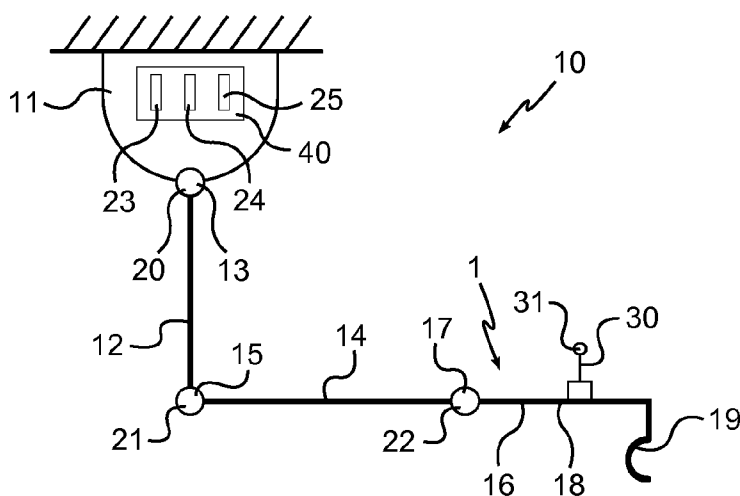


Fig. 1

(57) Abstract : The invention relates to a method for controlling an actuator (20, 21, 22) of an articulated segment (12, 13, 14) of a collaborative robot (10) with force amplification, the actuator being controlled by a controller (23, 24, 25) comprising regulatable control parameters, the method comprising the steps of: synthesising a law of optimisation of control parameters of type H_∞ satisfying the following performance objective: $\min (\| \Pi W_y h(s) Y_{rh}(s) \|_\infty)$ where $W_y h(s) = 1/(J_r s)$ and in which $Y_{rh}(s)$ is the admittance of the robot (10) taken at the level of the actuator (21, 22, 23) in relation to the forces applied by the user to the collaborative robot (10), s being the Laplace variable, the synthesis of the law of optimisation being carried out taking into account at least one sensitivity function; regulating the controller (23, 24, 25); and controlling the actuator (23, 24, 25) of the articulated segment (12, 13, 14).

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]



Procédé de commande d'un actionneur (20,21,22) d'un segment articulé (12,13,14) d'un robot collaboratif (10) à amplification d'effort, l'actionneur étant commandé par un contrôleur (23,24,25) comprenant des paramètres de commande réglables, le procédé comprenant les étapes de : - synthétiser une loi d'optimisation de paramètres de commande de type H^∞ répondant à l'objectif de performance suivant : $\min (\|W_{yh}(s)Y_{rh}(s)\|_\infty)$ avec $W_{yh}(s)^l = 1/(Jr s)$ et dans laquelle $Y_{rh}(s)$ est l'admittance du robot (10) considérée au niveau de l'actionneur (21,22,23) vis-à-vis des efforts appliqués par l'utilisateur sur le robot collaboratif (10), s étant la variable de Laplace, la synthèse de la loi d'optimisation se faisant en prenant en compte une ou plusieurs fonctions de sensibilité - régler le contrôleur (23,24,25); commander l'actionneur (23,24,25) du segment articulé (12, 13, 14).

Procédé de commande d'un actionneur d'un segment articulé d'un robot collaboratif à amplification d'effort

DOMAINE DE L'INVENTION

5 L'invention se rapporte au domaine des robots collaboratifs à amplification d'effort et plus particulièrement aux lois de commande des actionneurs de tels robots

ARRIERE PLAN DE L'INVENTION

10 Un bras robotisé comprend classiquement une pluralité de segments articulés, chaque articulation étant pourvue d'un actionneur. Le bras robotisé est relié à une interface d'utilisation par une unité de commande qui applique une loi de commande d'amplification à chaque actionneur. Des capteurs de déplacement et un capteur
15 d'effort situés sur l'interface d'utilisation fournissent des mesures d'effort, de vitesse et de position à l'unité de commande qui commande alors les différents actionneurs selon une loi de commande propre à chaque actionneur. Les actionneurs peuvent eux-mêmes, fournir des informations
20 de position et/ou d'effort. Il est connu d'utiliser des contrôleurs Proportionnel Intégral (PI) qui délivrent un signal de commande à partir de la différence entre une consigne et une mesure du mouvement. Les gains proportionnel et intégral de ces contrôleurs sont paramétrés en
25 prenant en compte des paramètres mécaniques structurels simples tel que l'inertie et l'amortissement.

Il est souhaitable de développer des contrôleurs pouvant prendre en compte des caractéristiques complexes intrinsèques de l'actionneur, du segment et d'un niveau
30 de performance attendu, et qui posséderaient un plus grand nombre de paramètres de réglage. Il peut s'agir, par exemple, de contrôleurs PID possédant un gain propor-

tionnel , un gain intégral et un gain dérivé. Il est également possible d'ajouter des paramètres supplémentaires comme un gain sur une anticipation. Tout comme il peut s'agit de contrôleurs amplement plus complexes. De tels
5 contrôleurs permettent une meilleure commande des actionneurs et une amélioration du ressenti de l'utilisateur. Bien qu'ils offrent des conditions d'utilisation améliorée, les contrôleurs à plus de deux degrés de liberté sont peu répandus car le paramétrage de tels contrôleurs
10 est très difficile à réaliser de manière analytique.

OBJET DE L'INVENTION

Un objet de l'invention est d'améliorer la commande des actionneurs d'un robot collaboratif, notamment en facilitant le paramétrage du contrôleur de ces
15 actionneurs.

RESUME DE L'INVENTION

A cet effet, on prévoit, selon l'invention, un procédé de commande d'un actionneur d'un segment articulé d'un robot collaboratif à amplification d'effort, l'actionneur étant commandé par un contrôleur comprenant des paramètres de commande réglables, le procédé comprenant les étapes de :

- déterminer des fonctions de transfert monovariables du segment articulé ;
- 25 - déterminer une inertie apparente J_r du robot sur l'actionneur;
- synthétiser une loi d'optimisation de paramètres de commande de type H_∞ répondant à l'objectif de performance suivant :

$$\text{minimiser}(\|W_y h(s) Y_r h(s)\|_\infty)$$

30 avec $W_y h(s) = J_r s$ et dans laquelle $Y_r h(s)$ est

l'admittance du robot considérée au niveau de l'actionneur vis-à-vis des efforts appliqués par l'utilisateur sur le robot, s étant la variable de Laplace,

5 la synthèse de la loi d'optimisation se faisant en prenant en compte une ou plusieurs des fonctions de sensibilité suivantes :

$$\text{minimiser}(\|1 - W_{yh}(s)Yrh(s)\|_{\infty}) ;$$

$$\text{minimiser}(\|W_{yh}^{-1}(s) - Yrh(s)\|_{\infty}) ;$$

10 $\text{minimiser}(\|1 - W_{yh}(s)Yrh(s)\|_2) ;$

$$\text{minimiser}(\|W_{yh}^{-1}(s) - Yrh(s)\|_2)$$

- régler le contrôleur en utilisant les paramètres de commande optimisés issus de la loi d'optimisation de paramètres de commande ;

15 - commander l'actionneur du segment articulé à l'aide du contrôleur ainsi paramétré.

On obtient alors un contrôleur qui peut comprendre un nombre important de degrés de liberté sans que cela accroisse la difficulté de paramétrage du contrôleur.

20 Avantageusement, la détermination de la loi de commande comprend une ou plusieurs contraintes supplémentaires de stabilité en interaction choisies parmi les contraintes suivantes :

$$\|Fu(M, Y_{rh}(s))\|_{\infty} < 1$$

$$\left\| Fu\left(M, \frac{Y_{rh}(s)}{Y_{re}(s)}\right) \right\|_{\infty} < 1$$

$$\left\| Fu\left(M, \frac{Y_{rh}(s)}{s Y_{re}(s)}\right) \right\|_{\infty} < 1$$

$$\left\| Fu\left(M, \frac{Y_{re}(s) J_{tmax} s + 1}{Y_{rh}(s)}\right) \right\|_{\infty} < 1$$

Dans lequel M est une matrice d'interconnexion de l'actionneur s'écrivant sous la forme

$$\begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

J_{tmax} est l'inertie supplémentaire maximale imposée au segment ;

5 Y_{re} est l'admittance du robot considérée au niveau de l'actionneur vis-à-vis des efforts appliqués par l'environnement sur le robot ;

; et Fu est un opérateur mathématique appelé transformée linéaire fractionnaire haute.

10 Ceci permet de garantir la passivité du contrôleur, à savoir le fait qu'il ne fournisse pas plus d'énergie au système qu'il n'en reçoit. Ce qui a pour conséquence d'assurer la stabilité du robot quand il est au contact de son environnement.

15 BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

Il sera fait référence aux figures annexées parmi lesquelles :

- la figure 1 est une représentation schématique en plan d'un bras articulé ;
- 20 - la figure 2 est une représentation schématique de l'architecture d'un contrôleur de segment articulé du bras articulé de la figure 1.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

Le procédé de l'invention va être décrit en référence à un bras articulé 1 d'un robot 10 collaboratif à
 25 amplification d'effort pourvu d'une interface de commande
 30 pourvue d'un capteur d'effort 31. Le robot 10 comprend une base 11 sur laquelle est articulé un premier segment 12 par une première articulation 13, le premier segment
 30 12 est articulé à un deuxième segment 14 par une deuxième

articulation 15. Le deuxième segment 14 est également articulé à un troisième segment 16 par une articulation 17. L'extrémité 18 du troisième segment 16 est pourvue des moyens de liaison d'une charge à manipuler, ici un crochet 19. Les rotations des première, deuxième et troisième articulations 13, 15 et 17 sont respectivement assurées par un premier, deuxième et troisième actionneur 20, 21 et 22. Les premier, deuxième et troisième actionneurs 20, 21 et 22 sont respectivement reliés à un premier, deuxième et troisième contrôleur 23, 24 et 25 d'une unité de commande 40, ici implantée dans la base 11. Les actionneurs 20 à 22 sont chacun pourvus de codeurs de position et de moteurs qui permettent d'effectuer des mesures de position et d'effort.

Le procédé selon l'invention va être décrit en lien avec le paramétrage du premier contrôleur 23 en charge de la commande du premier actionneur 20 de l'articulation 12. Le procédé s'applique identiquement au paramétrage des deuxième et troisième contrôleurs 24, 25 et à la commande des deuxième et troisième actionneurs 21, 22. L'architecture du premier contrôleur 23 de l'articulation 13 du premier segment 12 est représentée en figure 2.

Dans la figure 2, le premier segment 12 est représenté, en ce qui concerne ses interactions avec le contrôleur 23, par un bloc $H(s)$ qui comprend les entrées et sorties suivantes :

F_e : effort appliqué par l'environnement sur le robot 10 ;

F_h : effort appliqué par l'utilisateur sur le robot 10 ;

J^T : la matrice jacobienne transpose du robot 10 qui

permet de passer des efforts F_e et F_h appliqués sur le robot à ces mêmes efforts considérés au niveau de l'actionneur 23;

5 $\dot{q}_r(s)$: la vitesse appliquée sur l'interface 30 et projetée dans l'espace articulaire de l'articulation 13;

$\dot{\theta}_m(s)$: la vitesse de rotation du premier actionneur 20 ;

$\dot{\theta}_{ref}(s)$: la consigne de vitesse du moteur 20 issue du contrôleur 23.

10

Le contrôleur 23 est un contrôleur d'amplification de force liberté qui

comprend les quatre paramètres de commande suivants :

15 - un gain proportionnel K_p et un gain intégral K_i pour le contrôleur Proportionnel Intégral K_f .

- un gain F_f d'anticipation ;

- une fréquence de coupure ω_c du filtre passe-bas PB.

20

Le gain d'amplification de force α est défini en fonction de l'envie de l'utilisateur du robot. Un fort gain permet de réaliser la tâche souhaitée à moindre effort de l'utilisateur. Il minimise cependant le ressenti par l'utilisateur des efforts échangés entre le robot et l'environnement de travail. Ici, le gain α est égal à 10.

25

Le procédé de commande comprend une première étape d'identifier les quatre fonctions de transfert mono-variables du premier segment 12 dont la rotation par rapport à la base 11 est contrôlée par le premier actionneur 20 commandé par le premier contrôleur 23. Les fonctions de transfert du premier segment 12 sont les suivantes :

30

$$H_{11}(s) = \frac{q_r(s)}{F(s)} ;$$

$$H_{12}(s) = \frac{q_r(s)}{\dot{\theta}_{ref}(s)} ;$$

$$H_{21}(s) = \frac{\dot{\theta}_m(s)}{F(s)} ;$$

$$H_{22}(s) = \frac{\dot{\theta}_m(s)}{\dot{\theta}_{ref}(s)} .$$

5 Avec :

$F(s)$: la force appliquée à l'extrémité du capteur 31 et projetée dans l'espace articulaire de l'articulation 13 à travers la matrice jacobienne trans-
pose J^T du robot.

10 L'identification des fonctions de transfert peut se faire par plusieurs méthodes, dont une méthode comprenant une désactivation du contrôleur 23, une excitation du premier actionneur 20 par un signal sinusoïdal wobulé en fréquence et l'enregistrement des mesures d'effort du
15 capteur 31 projeté dans l'espace articulaire de l'articulation 13 à travers la matrice jacobienne trans-
pose J^T du robot ainsi que l'enregistrement de la position du premier actionneur 20. Un protocole de mesure de ce type a notamment été décrit par X. Lamy, dans le para-
20 graphe 2.3.2 du document « Xavier Lamy. Conception d'une Interface de Pilotage d'un Cobot. Automatique / Robotique. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2011. Français. » notamment accessible à l'adresse suivante <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00748986/>.

25 Selon une deuxième étape du procédé, l'inertie apparente J_r du segment 12 est également déterminée. Ceci peut se faire selon plusieurs méthodes connues, notamment par détermination de la fonction de réponse en fréquence du segment 12 et lecture directe de l'inertie du segment

sur la courbe ainsi obtenue.

Selon une troisième étape, on synthétise une loi d'optimisation de paramètres de commande de type H_∞ répondant à l'objectif de performance suivant :

$$(50) \text{ minimiser}(\|W_{yh}(s) Y_{rh}(s)\|_\infty)$$

avec $W_{yh}(s) = (Jr s)$. L'admittance $Y_{rh}(s) = \frac{q_r(s)}{F(s)}$ est l'admittance du robot (10) considérée au niveau de l'actionneur (21,22,23) vis-à-vis des efforts appliqués par l'utilisateur sur le robot 1 via la commande 30. s est la variable de Laplace.

La loi de type H_∞ est calculée en prenant en compte la fonction de sensibilité suivante :

$$(51) \text{ minimiser}(\|1 - W_{yh}(s) Y_{rh}(s)\|_\infty)$$

Les itérations de calculs de la loi d'optimisation de paramètres de commande (50) sont effectuées en utilisant un outil de calcul numérique du type Matlab systune et aboutissent à des valeurs optimisées des paramètres de commande K_p , K_i , F_f .

La fréquence de coupure ω_c du filtre passe-bas PB est déterminée à l'aide d'une loi d'optimisation de paramètres de commande de type H_∞ répondant à l'objectif de performance suivant :

$$(52) \text{ minimiser}(\|W_{amp}(s)(Y_{rh}^{cl}(s) - \alpha Y_{re}^{cl}(s))\|_\infty)$$

$$\text{avec } W_{amp}(s) = \frac{p_0 s + \delta}{s + \omega_c}$$

avec

$Y_{rh}^{cl}(s)$: l'admittance en boucle fermée du robot (10) considérée au niveau de l'actionneur (21,22,23) vis-à-vis des efforts appliqués par l'utilisateur sur le robot 1 via la commande 30 ;

$Y_{re}^{cl}(s)$: l'admittance en boucle fermée du robot (10) considérée au niveau de l'actionneur (21,22,23) vis-à-vis des efforts appliqués par l'environnement sur le robot 1 via la commande 30 ;

5 δ : l'erreur autorisée sur le gain en amplification, p_0 : le dépassement transitoire autorisé exprimé en pourcentage.

L'admittance en boucle fermée $Y_{rh}^{cl}(s)$ est l'admittance de l'actionneur 20 lorsque son contrôleur 23 est actif.

10 L'admittance en boucle fermée $Y_{re}^{cl}(s)$ est l'admittance de l'actionneur 20 lorsque son contrôleur 23 est désactivé.

Ces valeurs optimisées sont entrées dans le contrôleur 23 et le premier segment 12 peut alors être commandé à l'aide du contrôleur 23 ainsi paramétré. Le procédé de commande selon l'invention est effectué préalablement à la mise en service du bras articulé et il n'est pas nécessaire de répéter celui-ci lors des opérations de commande ultérieure du premier segment 12.

20 Afin de garantir la passivité de la commande, la synthèse de la loi d'optimisation des paramètres de commande (50) est effectuée en comprenant une contrainte supplémentaire de stabilité en interaction s'exprimant sous la forme

25 (53) $\left\| Fu(M, \frac{Y_{re}(s)J_{tmax} s+1}{Y_{rh}(s)}) \right\|_{\infty} < 1$

Dans lequel M est une matrice d'interconnexion de l'actionneur s'écrivant sous la forme

$$\begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

J_{tmax} est l'inertie maximale supplémentaire imposée au segment ;

Y_{re} est l'admittance du robot 10 considérée au niveau de l'actionneur 23 vis-à-vis des efforts appliqués par l'environnement sur le robot 10; et Fu est un opérateur mathématique appelé transformée linéaire fractionnaire haute.

Ici, la valeur de J_{tmax} est définie en se basant sur une valeur maximale de l'inertie qu'un outil ou une charge rigidement liée au crochet 19 est autorisée à avoir. J_{tmax} correspond à l'inertie supplémentaire, c'est-à-dire venant s'ajouter à l'inertie propre du segment considéré, spécifique à l'utilisation envisagée du robot 10 et peut être définie en prenant en considérations des paramètres variés comme la résistance mécanique du robot 10 ou des critères de sécurité de l'utilisateur et/ou son environnement. Les fonctions de sensibilité suivantes permettent également d'obtenir des paramètres de commande optimisés et peuvent être soit substituées à la fonction de sensibilité (51), soit être utilisées en addition de celle-ci pour affiner encore les résultats obtenus.

$$(54) \text{ minimiser}(\|W_{yh}^{-1}(s) - Yrh(s)\|_{\infty}) ;$$

$$(55) \text{ minimiser}(\|1 - W_{yh}(s)Yrh(s)\|_2) ;$$

$$(56) \text{ minimiser}(\|W_{yh}^{-1}(s) - Yrh(s)\|_2).$$

De même, les contraintes supplémentaire de stabilité en interaction suivantes permettent d'améliorer encore les paramètres de commande et peuvent être soit substituées à la contrainte stabilité en interaction (52), soit être utilisées en addition de celle-ci pour affiner encore les résultats obtenus.

$$(57) \|Fu(M, Y_{rh}(s))\|_{\infty} < 1$$

$$(58) \|Fu\left(M, \frac{Y_{rh}(s)}{Y_{re}(s)}\right)\|_{\infty} < 1$$

$$(59) \quad \left\| Fu \left(M, \frac{Y_{rh}(s)}{s Y_{re}(s)} \right) \right\|_{\infty} < 1$$

Les contraintes de stabilité en interaction (53), (57), (58) et (59) peuvent être utilisées isolément ou cumulées pour améliorer encore la stabilité en interaction de la commande.

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits mais englobe toute variante entrant dans le champ de l'invention telle que définie par les revendications.

En particulier,

- bien qu'ici le contrôleur du segment articulé comprenne quatre paramètres de commande à régler, l'invention s'applique également à des contrôleurs comprenant un nombre différent de degrés de liberté comme par exemple un contrôleur comprenant entre un et trois degrés de liberté ou plus de quatre ;

- bien qu'ici le gain d'amplification de force de l'exosquelette soit égal à 10, l'invention s'applique également à des lois de commande comprenant un gain d'amplification différents, pouvant être inférieur ou supérieur à 1, voire supérieur à 10 ;

- bien qu'ici les calculs de la loi d'optimisation de paramètres de commande soient effectués par itération à l'aide d'un outil de calcul de type Matlab systune, l'invention s'applique également à d'autres types d'outil de calcul, pouvant comprendre des calculs manuels, ou l'utilisation d'autres outils tels que Free-math, Gauss ou Mathcad ;

- bien qu'ici le procédé comprenne une contrainte supplémentaire garantissant la passivité de la commande, l'invention s'applique également à un procédé dont la

synthèse de la loi d'optimisation des paramètres de commande ne comprend pas de contrainte relative à la passivité de la commande ;

- bien qu'ici le procédé de commande comprenne
- 5 une étape d'optimisation de la fréquence de coupure d'un filtre passe-bas incorporé au contrôleur, l'invention s'applique également à un procédé de commande d'un actionneur contrôlé par d'autres types de contrôleurs, comme par exemple un contrôleur comme par exemple un
- 10 filtre passe-haut, un filtre passe-bande ou un contrôleur ne comprenant pas de filtre fréquentiel. Dans ce dernier cas, l'étape d'optimisation de la fréquence de coupure n'est pas effectuée.

REVENDECATIONS

1. Procédé de commande d'un actionneur (20,21,22) d'un segment articulé (12,13,14) d'un robot collaboratif (10) à amplification d'effort, l'actionneur étant commandé par un contrôleur (23,24,25) comprenant des paramètres de commande réglables (K_p , K_i , F_f , ω_c), le procédé comprenant les étapes de :

- déterminer des fonctions de transfert mono-variables ($H_{11}(s), H_{12}(s), H_{21}(s), H_{22}(s)$) du robot considérée au niveau de l'actionneur (20,21,22);

- déterminer une inertie apparente J_r du robot (10) sur l'actionneur (20,21,22);

- synthétiser une loi d'optimisation de paramètres de commande de type H^∞ répondant à l'objectif de performance suivant :

$$\text{minimiser}(\|W_{yh}(s)Y_{rh}(s)\|_\infty)$$

avec $W_{yh}(s)^1 = 1/(J_r s)$ et dans laquelle $Y_{rh}(s)$ est l'admittance du robot (10) considérée au niveau de l'actionneur (21,22,23) vis-à-vis des efforts appliqués par l'utilisateur sur le robot collaboratif (10), s étant la variable de Laplace,

la synthèse de la loi d'optimisation se faisant en prenant en compte une ou plusieurs des fonctions de sensibilité suivantes :

$$(54) \text{ minimiser}(\|W_{yh}^{-1}(s) - Y_{rh}(s)\|_\infty) ;$$

$$(55) \text{ minimiser}(\|1 - W_{yh}(s)Y_{rh}(s)\|_2) ;$$

$$(56) \text{ minimiser}(\|W_{yh}^{-1}(s) - Y_{rh}(s)\|_2).$$

- régler le contrôleur (23,24,25) en utilisant les paramètres de commande (K_p , K_i , F_f , ω_c) optimisés issus de la loi d'optimisation de paramètres de commande ;

- commander l'actionneur (23,24,25) du segment articulé (12,13,14) à l'aide du contrôleur (23,24,25) ainsi paramétré.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la détermination de la loi H_∞ comprend une ou plusieurs contraintes supplémentaires de stabilité en interaction choisies parmi les contraintes suivantes :

$$\begin{aligned} \|Fu(M, Y_{rh}(s))\|_\infty &< 1 \\ \left\| Fu\left(M, \frac{Y_{rh}(s)}{Y_{re}(s)}\right) \right\|_\infty &< 1 \\ \left\| Fu\left(M, \frac{Y_{rh}(s)}{s Y_{re}(s)}\right) \right\|_\infty &< 1 \\ \left\| Fu\left(M, \frac{Y_{re}(s) J_{tmax} s + 1}{Y_{rh}(s)}\right) \right\|_\infty &< 1 \end{aligned}$$

Dans lequel M est une matrice d'interconnexion de l'actionneur s'écrivant sous la forme

$$\begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

10 J_{tmax} est l'inertie maximale imposée au segment ;

Y_{re} est l'admittance du robot (10) considérée au niveau de l'actionneur (23) vis-à-vis des efforts appliqués par l'environnement sur le robot (10) ; et Fu est un opérateur mathématique appelé transformée linéaire fractionnaire haute.

3. Procédé de commande selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le contrôleur comprend un filtre fréquentiel passe-bas (PB) et le procédé de commande comprend une étape supplémentaire de déterminer une fréquence de coupure (ω_c) dudit filtre (PB) à l'aide d'une loi d'optimisation de type H_∞ répondant à l'objectif de performance suivant :

$$(52) \text{ minimiser}(\|W_{amp}(s)(Y_{rh}^{cl}(s) - \alpha Y_{re}^{cl}(s))\|_{\infty})$$

$$\text{avec } W_{amp}(s) = \frac{p_0 s + \delta}{s + \omega_c}$$

avec

5 $Y_{rh}^{cl}(s)$: l'admittance en boucle fermée du robot (10) considérée au niveau de l'actionneur (21,22,23) vis-à-vis des efforts appliqués par l'utilisateur sur le robot 1 via la commande 30 ;

10 $Y_{re}^{cl}(s)$: l'admittance en boucle fermée du robot (10) considérée au niveau de l'actionneur (21,22,23) vis-à-vis des efforts appliqués par l'environnement sur le robot 1 via la commande 30 ;

δ : l'erreur autorisée sur le gain en amplification,

15 p_0 : le dépassement transitoire autorisé exprimé en pourcentage.

1/1

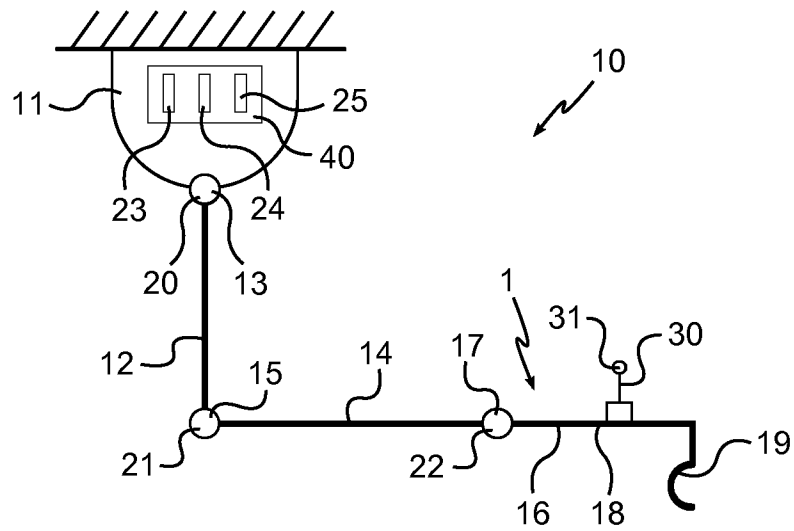


Fig. 1

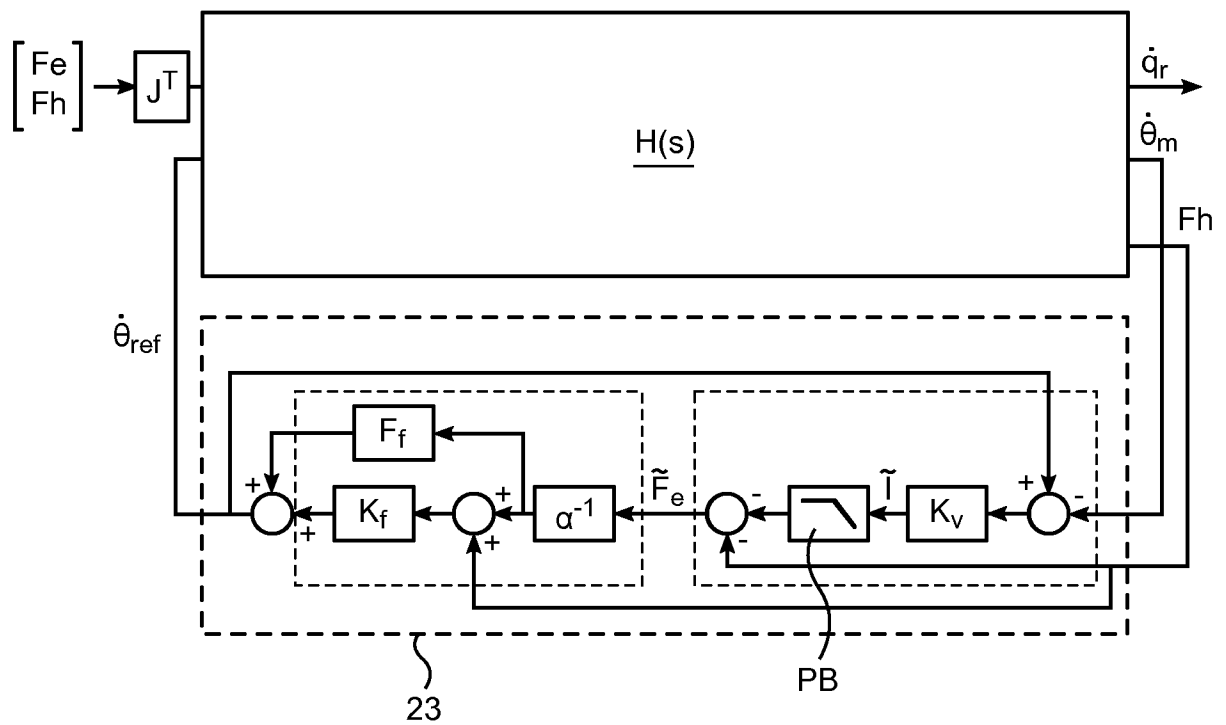


Fig. 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2016/080435A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. B25J9/00 G05B11/36
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
B25J G05B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2015/010897 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 29 January 2015 (2015-01-29) the whole document ----- -/--	1-3



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

3 February 2017

Date of mailing of the international search report

09/02/2017

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Postemer, Patricia

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2016/080435

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CHAPEL J D ET AL: "Attaining impedance control objectives using Hinfinity design methods", PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION SACRAMENTO, APR. 9 - 11, 1991; [PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION], LOS ALAMITOS, IEEE COMP. SOC. PRESS, US, vol. CONF. 7, 9 April 1991 (1991-04-09), pages 1482-1487, XP010023762, DOI: 10.1109/ROBOT.1991.131825 ISBN: 978-0-8186-2163-5 the whole document -----	1-3
A	MEHLING JOSHUA S ET AL: "A model matching framework for the synthesis of series elastic actuator impedance control", 22ND MEDITERRANEAN CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION, IEEE, 16 June 2014 (2014-06-16), pages 249-254, XP032687179, DOI: 10.1109/MED.2014.6961379 ISBN: 978-1-4799-5900-6 [retrieved on 2014-11-18] the whole document -----	1-3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2016/080435

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2015010897 A1	29-01-2015	EP 3024623 A1	01-06-2016
		FR 3008916 A1	30-01-2015
		JP 2016523727 A	12-08-2016
		US 2016136811 A1	19-05-2016
		WO 2015010897 A1	29-01-2015

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2016/080435

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. B25J9/00 G05B11/36
ADD.

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
B25J G05B

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	WO 2015/010897 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 29 janvier 2015 (2015-01-29) le document en entier ----- -/--	1-3



Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents



Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

3 février 2017

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

09/02/2017

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Postemer, Patricia

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	CHAPEL J D ET AL: "Attaining impedance control objectives using Hinfinity design methods", PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION SACRAMENTO, APR. 9 - 11, 1991; [PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION], LOS ALAMITOS, IEEE COMP. SOC. PRESS, US, vol. CONF. 7, 9 avril 1991 (1991-04-09), pages 1482-1487, XP010023762, DOI: 10.1109/ROBOT.1991.131825 ISBN: 978-0-8186-2163-5 le document en entier -----	1-3
A	MEHLING JOSHUA S ET AL: "A model matching framework for the synthesis of series elastic actuator impedance control", 22ND MEDITERRANEAN CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION, IEEE, 16 juin 2014 (2014-06-16), pages 249-254, XP032687179, DOI: 10.1109/MED.2014.6961379 ISBN: 978-1-4799-5900-6 [extrait le 2014-11-18] le document en entier -----	1-3

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2016/080435

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2015010897 A1	29-01-2015	EP 3024623 A1	01-06-2016
		FR 3008916 A1	30-01-2015
		JP 2016523727 A	12-08-2016
		US 2016136811 A1	19-05-2016
		WO 2015010897 A1	29-01-2015
