

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

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



PCT

(43) Date de la publication internationale
24 décembre 2008 (24.12.2008)

(10) Numéro de publication internationale
WO 2008/155287 A1

(51) Classification internationale des brevets :
B25J 9/16 (2006.01)

rue Leblanc, Immeuble "Le Ponant D", F-75015 PARIS
(FR).

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2008/057415

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (*pour US seulement*) : **BIDARD, Catherine** [FR/FR]; 31 boulevard de la Marne, F-67000 STRASBOURG (FR). **CHALFOUN, Joe** [FR/FR]; 19 rue Ginoux, F-75015 PARIS (FR). **KELLER, Delphine** [FR/FR]; 40 rue de Bellevue, F-92260 FONTENAY-AUX-ROSES (FR). **PERROT, Yann** [FR/FR]; 30 rue de Montlhéry, F-91700 SAINTE GENEVIEVE DES BOIS (FR).

(22) Date de dépôt international : 12 juin 2008 (12.06.2008)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(74) Mandataires : **LUCAS, Laurent** etc.; 31-33 Avenue Aristide Briand, F-94117 ARCUEIL (FR).

(30) Données relatives à la priorité :
0704286 15 juin 2007 (15.06.2007) FR

(81) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AO,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: PROCESS FOR CALIBRATING THE POSITION OF A MULTIPLY ARTICULATED SYSTEM SUCH AS A ROBOT

(54) Titre : PROCEDE DE CALIBRATION DE LA POSITION D'UN SYSTEME POLY-ARTICULE, NOTAMMENT D'UN ROBOT

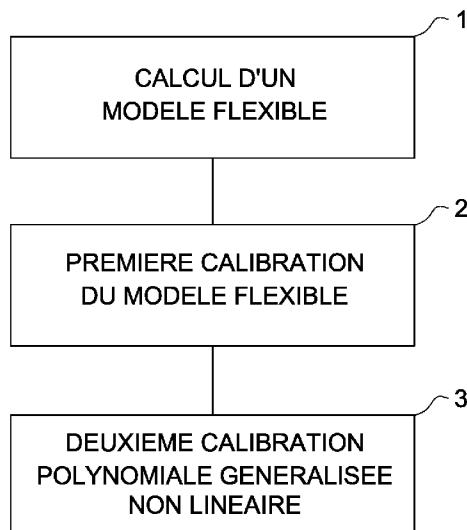


FIG.1

- 1 CALCULATION OF A FLEXIBLE MODEL
- 2 FIRST CALIBRATION OF THE FLEXIBLE MODEL
- 3 SECOND NONLINEAR GENERALIZED POLYNOMIAL CALIBRATION

(57) **Abstract:** The present invention relates to a process for calibrating the position of a multiply articulated system such as a robot. The multiply articulated system is composed of a chain of N segments interconnected by an articulated connection. The calibration minimizes the difference between the measured position X_m of a member connected to the last segment of the chain and its calculated position X_c , X_c being equal to the product $A_1.A_2... A_i.....A_N.X_N$, a homogeneous transformation matrix A_i being associated with each segment of order i, and this matrix being a function of system configuration parameters (q) and of given generalized parameters (p) characterizing the flexibility of the segment. The process comprises:- a first step (1) of calculating a flexible model of the system composed of the matrices $A_1, A_2... A_i.....A_N$; - a second step (2) of calibrating the flexible model by obtaining a set of generalized parameters (popt) which minimizes the difference between X_m and X_c ; - a third step (3) of generalized polynomial calibration of the flexible model by the insertion of generalized error matrices E_j between the homogeneous transformation matrices in the flexible model, the calculated position X_c being equal to the product $A_1.E_1.A_2.E_2.....A_N.E_N.X_N$, a generalized error matrix E_i being associated with each segment of order i, and each matrix E_i of a segment being a polynomial function of the configuration parameters (q) connected to the segment.

(57) **Abrégé :** La présente invention concerne un procédé de calibration de la position d'un système poly-articulé, notamment d'un robot. Le système poly-articulé étant composé d'une chaîne de N segments reliés entre eux par une liaison articulée, la calibration minimisant la différence entre la position mesurée X_m d'un organe lié au dernier segment de la chaîne et sa position calculée X_c , X_c étant égale au produit $A_1.A_2... A_i.....A_N.X_N$, une matrice A_i de transformation homogène étant associée à chaque segment d'ordre i, cette matrice étant fonction de paramètres de configuration (q) du système et de paramètres généralisés donnés (p) caractérisant la flexibilité du segment, le procédé

[Suite sur la page suivante]

WO 2008/155287 A1



AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, 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, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM,

ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— *avec rapport de recherche internationale*

comporte : - une première étape (1) de calcul d'un modèle flexible du système composé des matrices $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_N$; - une deuxième étape (2) de calibration du modèle flexible par l'obtention d'un ensemble de paramètres généralisés (popt) minimisant la différence entre X_m et X_c ; - une troisième étape (3) de calibration polynomiale généralisée du modèle flexible par l'introduction de matrices d'erreur généralisées E_j entre les matrices de transformation homogène dans le modèle flexible, la position calculée X_c étant égale au produit $A_1 \cdot E_1 \cdot A_2 \cdot E_2 \dots \cdot A_N \cdot E_N \cdot X_N$, une matrice d'erreur généralisée E_i étant associée à chaque segment d'ordre i, chaque matrice E_i d'un segment étant une fonction polynomiale des paramètres de configuration (q) liés au segment.

PROCEDE DE CALIBRATION DE LA POSITION D'UN SYSTEME POLY-ARTICULE, NOTAMMENT D'UN ROBOT

La présente invention concerne un procédé de calibration de la position d'un système poly-articulé, notamment d'un robot. Elle s'applique en particulier dans le domaine de la robotique. Elle permet de corriger l'erreur de position notamment sur des systèmes de type poly-articulés en chaîne pour lesquels la flexibilité des différents éléments de la chaîne influe sur le comportement, par exemple dans le cas d'une chaîne à fort élancement. Ces systèmes sont par exemple des robots, des manipulateurs, des grues ou des machines outil.

Ces systèmes poly-articulés peuvent être utilisés pour l'inspection des cellules et des réacteurs nucléaires ainsi que pour la maintenance de satellites et de vaisseaux spatiaux dans l'espace par exemple.

15

Dans la suite le terme robot sera utilisé pour décrire tous ces systèmes, qu'ils soient ou non à fort élancement.

Diverses solutions mettent en œuvre la calibration géométrique classique. Celles-ci sont notamment décrites dans le livre de B.Mooring « Fundamentals of Manipulator Calibration », J.Wiley, New-York 1991 et l'article de Z.S.Roth, Z.W.Mooring et B.Ravani « An Overview of Robot Calibration », IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 3(5), 1987, pages 377-385. Ces solutions identifient les paramètres du modèle rigide du robot, notamment les longueurs. La correction d'erreur de position en bout de chaîne est très limitée avec ces méthodes classiques.

D'autres études ont développé une méthode de calibration géométrique et élastique linéaire pour régler l'erreur de position sur des robots industriels. Cette méthode est notamment décrite dans l'article de Ph.Drouet, S.Dubowsky, S.Zeghloul et C.Mavroidis « Compensation of Geometric and 30 Elastic Errors in Large Manipulators with an Application to a High Accuracy Medical System », Robotica 2, 2002 pages 341-352. Cependant pour des robots qui possèdent une flexibilité importante dans leur structure, cette méthode n'est pas satisfaisante.

Il est par ailleurs connu d'utiliser un modèle généralisé polynomial linéaire pour corriger les petites erreurs de position des manipulateurs de grande taille. Cette solution est notamment décrite dans les articles de G.Alici et

- B.Shirinzadeh « A Systematic Technique to Estimate Positionning Errors for Robot Accuracy Improvement Using Laser Interferometry Based Sensing », Mechanism and Machine Theory 40, 2005, pages 879-906 et de M.Meggiolaro, S.Dubowsky et C.Mavroidis « Geometric and Elastic Error 5 Calibration of a High Accuracy Patient Positionning System », Mechanism and Machine Theory, vol. 40, 2005, pages 415-427. Dans le premier article, on utilise des polynômes ordinaires et des polynômes de Fourier mais la correction n'est appliquée que sur la dernière articulation. Dans le deuxième 10 article, on utilise des polynômes spéciaux appliqués sur toutes les articulations du manipulateur. Cependant, en appliquant, en simulation, ces deux méthodes, notamment pour un robot poly-articulé à fort élancement, on ne parvient pas à corriger suffisamment l'erreur de position en bout de chaîne.
- Une autre méthode connue consiste à réaliser une modélisation flexible du 15 manipulateur avec des poutres, puis à lancer une procédure d'identification des paramètres flexibles du modèle. Cette méthode est notamment décrite dans l'article de W.Khalil et E. Dombre « Modélisation, identification et commande des robots », Germes, ISBN 2-7462-0003-1, 1999. Elle donne des résultats encore insuffisants pour corriger l'erreur de position du robot. A 20 titre d'exemple avec ces méthodes, pour une longueur totale de chaîne articulée de l'ordre d'une dizaine de mètre, on obtient des erreurs de position de plusieurs dizaines de centimètres en bout de chaîne alors que l'on souhaite atteindre une précision de l'ordre de 10 centimètres.
- 25 Un but de l'invention est notamment d'améliorer la précision. A cet effet, l'invention a pour objet un procédé de calibration de la position d'un système poly-articulé composé d'une chaîne de N segments reliés entre eux par une liaison articulée, la calibration minimisant la différence entre la position mesurée X_m d'un organe lié au dernier segment de la chaîne et sa position 30 calculée X_C , X_C étant égale au produit $A_1.A_2 \dots A_i \dots A_N.X_N$, une matrice A_i de transformation homogène étant associée à chaque segment d'ordre i, cette matrice étant fonction de paramètres de configuration q du système et de paramètres généralisés donnés p caractérisant la flexibilité du segment, ledit procédé comportant :

- une première étape de calcul d'un modèle flexible du système composé des matrices $A_1, A_2 \dots A_i \dots A_N$;
 - une deuxième étape de calibration du modèle flexible par l'obtention d'un ensemble de paramètres généralisés p_{opt} minimisant la différence entre X_m et X_c ;
 - une troisième étape de calibration polynomiale généralisée du modèle flexible calibré à l'étape 2 par l'introduction de matrices d'erreur généralisées E_i entre les matrices de transformation homogène dans le modèle flexible, la position calculée X_c étant égale au produit $A_1.E_1.A_2.E_2\dots A_N.E_N.X_N$, une matrice d'erreur généralisée E_i étant associée à chaque segment d'ordre i , chaque matrice E_i d'un segment étant une fonction polynomiale des paramètres de configuration q liés au segment.
- 15 Dans un mode de mise en œuvre particulier, dans la première étape, le modèle flexible du système est, par exemple, obtenu par la détermination de nouveaux paramètres généralisés p à partir des paramètres rigides du système selon un processus itératif :
- un modèle géométrique est calculé en fonction de paramètres de configuration, de paramètres généralisés d'origine et de propriétés géométriques du système ;
 - des déformations du système sont calculées en fonction du modèle géométrique et de contraintes mécaniques ;
 - de nouveaux paramètres généralisés sont calculés en fonction des déformations ;
 - les nouveaux paramètres généralisés sont comparés aux paramètres d'origine ;
 - si la différence ΔP entre les nouveaux paramètres et les paramètres d'origine est inférieure à un seuil ϵ donné, le modèle flexible est obtenu à partir des nouveaux paramètres généralisés ;
 - dans le cas contraire, une nouvelle itération est exécutée, cette itération rectifiant le modèle en utilisant les nouveaux paramètres généralisés.

Les contraintes mécaniques peuvent comporter des contraintes de flexibilité appartenant aux paramètres généralisés p .

Les paramètres de configuration q comportent, par exemple, les angles des axes de rotation et d'élévation par rapport à une référence donnée.

Un segment est, par exemple, modélisé par un parallélogramme et un axe de

rotation s'articulant entre deux chapes, une première chape appartenant au

5 segment et la deuxième chape appartenant au segment suivant dans la chaîne, le parallélogramme modélisant un mouvement d'élévation autour d'un axe passant par un sommet du parallélogramme, le segment étant soumis à des contraintes de torsion, de compression et de traction.

Une matrice d'erreur généralisée E_i associée à un segment est, par exemple,

10 une fonction non linéaire de six paramètres $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$, trois de ces paramètres $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ représentant les angles d'Euler correspondant au

mouvement de rotation d'un repère lié au segment, les trois autres paramètres $\varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$ représentant une translation dans l'espace du centre O_i

du repère, chaque paramètre généralisé est une fonction polynomiale des

15 composantes du vecteur de configuration q .

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à l'aide de la description qui suit, faite en regard de dessins annexés qui représentent :

- la figure 1, une présentation des étapes possibles pour la mise en œuvre d'un procédé selon l'invention ;
- la figure 2, un exemple de modèle cinématique d'un système poly-articulé ;
- la figure 3, un exemple de réalisation d'un segment appartenant à une chaîne poly-articulée ;
- la figure 4, un exemple de réalisation d'une articulation entre deux segments d'une chaîne poly-articulée ;
- la figure 5, un parallélogramme modélisant un segment ;
- la figure 6, un modèle flexible de l'ensemble d'un système poly-articulé ;
- la figure 7, une illustration des déformations d'une structure en parallélogramme sous l'influence de diverses contraintes ;
- la figure 8, une présentation d'un exemple de processus itératif utilisé dans la première étape du procédé selon l'invention ;
- la figure 9, une illustration de passages d'un repère lié à un segment à un repère lié à un autre segment.

La figure 1 présente les étapes possibles pour la mise en œuvre du procédé selon l'invention. Dans une première étape 1, on effectue un calcul d'un modèle flexible du robot par détermination de nouveaux paramètres 5 généralisés à partir des paramètres du modèle rigide du robot. Un modèle rigide est un modèle géométrique d'un système poly-articulé sans aucune flexibilité. Un modèle flexible est un modèle géométrique d'un système poly-articulé en introduisant des flexibilités. De façon générale, un modèle géométrique direct est un modèle mécanique utilisé en robotique pour les 10 bras manipulateurs notamment pour les robots poly-articulés. Il permet de déterminer la configuration, en position et orientation, de l'organe terminal d'un robot en fonction de la configuration de ses liaisons.

Puis, une double calibration est effectuée. Ainsi, dans une deuxième étape 2, une première calibration du modèle flexible est réalisée suivie dans une 15 troisième étape 3 d'une calibration polynomiale généralisée.

La figure 2 présente à titre d'exemple un modèle cinématique d'un robot poly-articulé à fort élancement. Dans cet exemple, la chaîne poly-articulée comporte cinq segments 21. Un organe terminal 22 est situé en bout de 20 chaîne, relié au dernier segment. Cet organe terminal 22, ou effecteur, est un outil placé à l'extrémité du robot, ce peut être une pince, une caméra ou tout autre type d'outil fonction de l'utilisation du robot. La liaison 23 entre l'effecteur 22 et le dernier segment 21 est rigide. Dans le modèle de la figure 2, chaque segment comporte un axe de rotation 24 et un 25 parallélogramme 25. Un axe de rotation 24 est compris entre deux chapes 26, 27, une première chape 26 appartenant au segment lui-même et une deuxième chape 27 appartenant au segment précédent. Cet axe de rotation 24 combiné aux chapes permet de modéliser un mouvement de rotation dans un plan X_0, Z_0 , par exemple le plan horizontal. D'autres types 30 d'articulation sont possibles. Le parallélogramme permet de modéliser un mouvement d'élévation autour d'un axe 29. Le premier segment de la chaîne est, par exemple, relié à une structure fixe 28 par une articulation du même type que celle reliant deux segments entre-eux, cette structure fixe 28 formant par exemple la base du robot à laquelle peut notamment est lié un 35 repère fixe.

La figure 3 présente un exemple de réalisation d'un segment 21. Ce segment comporte un tube 31 comportant à chaque extrémité une chape 26, 27. Une première chape 26 s'articule autour de la chape 27 du segment suivant par l'intermédiaire de l'axe de rotation 24. Les mouvements de rotation se font au moyen de poulies de rotation 32 entraînant un câble de rotation. Le tube 31 comporte à chaque extrémité un axe d'élévation 29. Il comporte par ailleurs à l'intérieur une bielle supérieure 33 et une bielle inférieure 34 connectées aux chapes 26, 27, ainsi qu'un actionneur d'élévation 35 et un actionneur de rotation 36.

La figure 4 illustre plus en détail un exemple de réalisation d'une articulation entre deux segments consécutifs. Plus particulièrement, la première chape 26 est représentée solidaire mécaniquement d'une poulie 32, la poulie 32 tournant autour de l'axe d'élévation 29, cette première chape étant par ailleurs reliée aux bielles 33, 34 par une connexion 41. La deuxième chape 27 appartenant au segment suivant se déplace selon un degré de rotation autour de l'axe 24. L'autre poulie 32 est solidaire de cet axe 24. Le câble de rotation 42 est entraîné par les deux poulies 32. L'axe de rotation 24 et l'axe d'élévation 29 sont perpendiculaires.

Un segment est soumis à des contraintes de torsion, de compression et de traction. Cependant, pour simplifier les calculs complexes des distorsions dans cette structure, les déformations de torsion sont, par exemple, délocalisées et sont représentées après l'axe d'élévation 29 à la base d'un parallélogramme 25 modélisant le segment. Seules les compressions et les tractions dans la structure du parallélogramme sont, par exemple, considérées. De cette manière, le parallélogramme reste contenu dans un plan.

La figure 5 présente plus précisément le modèle de structure flexible d'un parallélogramme 25. Ce dernier comporte quatre points A, B, C, D. Un point A représente l'axe d'élévation 29. Le grand côté AB 51 partant de ce point A représente le tube 31. Le côté opposé CD 52 représente la bielle 33, 34. Les extrémités du tube sont modélisées par les petits côtés AC 53, BD 54 du parallélogramme. Chaque élément 51, 52, 53, 54 admet un degré de liberté

dans la direction de compression et de traction. Les flexibilités de traction et de compression du tube 31 et de la bielle 33, 34 sont modélisées par des ressorts linéaires 55, 56 de raideurs respectives k_{tube} et k_{b1} . Le parallélogramme comporte par ailleurs une branche BJ 57, le point J appartenant au côté AB 53. Cette branche 57 représente l'action de l'actionneur d'élévation 35 qui contrôle le mouvement d'élévation. Cet actionneur peut être un vérin ou un jonc d'équilibrage. Un ressort linéaire 58, de raideur k_{j1} , symbolise la flexibilité de cet actionneur, c'est-à-dire par exemple du jonc ou du vérin.

10

La figure 6 illustre un modèle flexible de l'ensemble des segments 21 formant le robot. Au parallélogramme 25 de la figure 5 s'ajoute les articulations joignant les segments consécutifs 21. Globalement, chaque segment est modélisé par :

- 15 - un ressort 61 de raideur k_{t1} qui représente la torsion de la chape 26 en amont de l'axe de rotation 24 ;
- un ressort 62 de raideur k_{f1} qui représente la flexion de l'axe de rotation 24 ;
- un ressort 63 de raideur k_r qui représente l'élasticité des câbles de rotation 42 ;
- un ressort 64 de raideur k_{t2} qui représente la torsion de la chape 27 en aval de l'axe de rotation 24 ;
- un ressort 65 de raideur k_{tp} qui représente la torsion du parallélogramme 25 ;
20 - les ressorts 56, 58, 55 décrit précédemment, de raideur k_{b1} représentant la flexibilité de la bielle, de raideur k_{j1} représentant la flexibilité du vérin ou du jonc et de raideur k_{tube} représentant la flexibilité du tube en compression.

25 Ces flexibilités vont introduire une déformation de la structure. Le modèle géométrique direct MGD de rotation est obtenu en fonction de sept paramètres généralisés φ_{t1} , φ_{f1} , θ , φ_r , φ_{t2} , α , φ_{tb} qui représentent respectivement les angles de rotation de des ressorts 61, 62 de raideurs k_{t1} , k_{f1} , l'angle de rotation autour de l'axe de rotation, les angles de rotation de des ressorts 63, 64 de raideurs k_r , k_{t2} , l'angle de rotation autour de l'axe d'élévation, et l'angle de rotation du ressort 65 de raideur k_{tp} .

Pour calculer le MGD de rotation on utilise par exemple une matrice de transformation homogène (4x4) notée A. Cette matrice est fonction des paramètres généralisés et de la configuration du robot. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$5 \quad \mathbf{A}(\text{angle}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\text{angle}) & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}(1 \times 3) & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

où :

- le paramètre *angle* représente un des paramètres généralisés $\varphi_{t1}, \varphi_{f1}, \theta, \varphi_r, \varphi_{t2}, \alpha, \varphi_{tb}$;
- R est une matrice de rotation de dimension (3x3) ;
- 10 - T est un vecteur de translation de dimension (3x1) ;
- 0 est un vecteur nul de dimension (1x3).

Le MGD de rotation, représenté par une matrice A_r , se calcule alors selon la relation suivante :

$$15 \quad \mathbf{A}_r = \mathbf{A}(\varphi_{t1}) \times \mathbf{A}(\varphi_{f1}) \times \mathbf{A}(\theta) \times \mathbf{A}(\varphi_r) \times \mathbf{A}(\varphi_{t2}) \times \mathbf{A}(\alpha) \times \mathbf{A}(\varphi_{tb}) \quad (2)$$

La figure 7 montre la déformation de la structure de parallélogramme 25 sous l'influence des forces de compression et de traction provenant du poids des segments 21 qui le suivent. Le MGD du parallélogramme donne la position et 20 l'orientation de la pièce d'extrémité postérieure BD dans le système de coordonnées de la base du parallélogramme au point A. Ce calcul est géométrique et est réalisé dans un plan, le plan du parallélogramme. Le MGD du parallélogramme, représenté par une matrice de transformation homogène A_p , se calcule en fonction de trois paramètres généralisés, l'angle 25 α d'élévation précité et les longueurs l_{tube} du tube et l_{bielle} de la bielle.

Le MGD d'un segment est la combinaison du MGD du parallélogramme 25 et du MGD de l'axe de rotation 24. La combinaison des deux MGD se fait par une multiplication matricielle des matrices homogènes correspondantes A_r, A_p . La matrice représentative du MGD d'un segment d'ordre i est donc 30 obtenue par la relation suivante :

$$A_{\text{segment}i} = A_r \times A_p \quad (3)$$

Le MGD de la chaîne complète représentant un robot est obtenu en combinant les N segments de la chaîne, la matrice représentative de l'ensemble A_{robot} étant donnée par la relation suivante :

$$A_{\text{robot}} = A_{\text{segment1}} \times A_{\text{segment2}} \times \dots \times A_{\text{segmentN}} \quad (4)$$

Le modèle flexible a notamment pour but de fournir la position et l'orientation de l'effecteur 22 en fonction des positions articulaires imposées et des paramètres suivant :

- 10 - la masse, la longueur et la position du centre de gravité des segments 21 ;
- les raideurs k des différentes parties du robot et des paramètres généralisés.

Dans l'étape 1 de calcul du modèle flexible, on affecte des valeurs nominales a priori aux paramètres k. Un but des étapes suivantes est de définir les valeurs pour des robots réels, à partir des valeurs nominales a priori.

Ce modèle flexible initial peut donc être obtenu par un processus itératif. L'article de W. Khalil et E. Dombre « Modélisation, identification et commande des robots » décrit un tel processus itératif. Dans la présente étape 1 du procédé selon l'invention, la méthode de calcul peut néanmoins être différente et donc le processus itératif différent.

La figure 8 illustre ce processus itératif utilisé, par exemple, dans la première étape 1 du procédé selon l'invention. Le calcul commence, par exemple, par un modèle rigide. Pour un ensemble de configurations 81 et en utilisant les paramètres généralisés 82 et les propriétés géométriques de la structure 83, le MGD 84 du robot est calculé. En introduisant les flexibilités de la structure et l'effet de gravité imposé 85, les efforts appliqués sur les parallélogrammes 25 et les axes de rotation 24 sont calculés, ce qui permet de modéliser les déformations 86. Ces déformations 86 sont, par la suite, utilisées pour actualiser les paramètres généralisés 87 du robot et sont comparées 88 aux anciennes valeurs 82.

Si la différence ΔP entre les nouveaux et les anciens paramètres généralisés est inférieure à un seuil ϵ donné, le modèle flexible 90 est obtenu, à partir du

MGD actualisé 89 et des nouveaux paramètres généralisés 87. Dans le cas contraire 80, une nouvelle itération est exécutée, cette itération rectifiant l'ancien modèle 84 en utilisant les nouveaux paramètres généralisés. Cet algorithme est répété jusqu'à convergence. Environ trois à quatre itérations 5 peuvent être nécessaires pour obtenir une différence inférieure à 10^{-6} mètre ou radiant entre les différents paramètres généralisés.

La flexibilité des articulations 24, 26, 27 et des corps 25 du robot a un impact significatif sur la performance de ce dernier en ce qui concerne la précision de positionnement de l'effecteur 22, ainsi que sur la stabilité de cette 10 position. L'effet de gravité et la charge au bout de chaque segment 21 provoque une déviation des articulations flexibles, ce qui dégrade la performance du robot. Pour les robots de grandes dimensions notamment, les flexibilités qui ont déjà été prises en compte dans le calcul du modèle sont calibrées lors des deux étapes suivantes 2, 3.

15

La deuxième étape 2 comporte donc une phase de calibration ou d'étalonnage du modèle flexible obtenu dans la première étape 1. Le processus d'étalonnage minimise une grandeur $X_m - X_c$. Une grandeur X peut être un vecteur à six composantes incluant trois composantes de 20 translation et trois composantes de rotation. Une telle grandeur détermine le déplacement d'un point dans l'espace, en l'occurrence les positions des parallélogrammes ou la position de l'effecteur 22.

X_m est la position mesurée parmi les articulations des parallélogrammes et de l'effecteur. La sélection des mesures est notamment fonction de 25 l'application, des moyens de mesure et de la précision souhaitée. Cette position mesurée X_m peut donc représenter soit la position de l'effecteur 22, soit la position des articulations intermédiaires.

La position X_c est la position calculée par le MGD flexible du robot dans la première étape 1, pour les mêmes articulations ainsi que pour l'effecteur. X_c 30 est fonction du vecteur de configurations q et du vecteur des paramètres p .

Les configurations du système évoquées précédemment peuvent être représentées par le vecteur de configurations q , les composantes de ce vecteur étant les angles des articulations, ou axes de rotation, du robot.

Les paramètres identifiables du vecteur p sont notamment la masse, la 35 longueur, la position du centre de gravité, les raideurs des différentes parties

du robot et les paramètres généralisés décrits précédemment. Le vecteur X_c peut donc s'écrire selon la relation suivante :

$$X_c = f(p, q) \quad (5)$$

où :

5 $f(p, q) = A_1.A_2 \dots A_i \dots A_N.X_N \quad (6)$

X_N étant la position de l'effecteur 22 par rapport au dernier segment, le segment d'ordre N, cette position est facilement déterminable. A_i est la matrice de transformation homogène associée au segment d'ordre i décrite 10 précédemment relativement à la relation (1).

En utilisant par exemple le vecteur p_0 des paramètres, p_0 ayant été utilisé dans la première étape comme représentant les paramètres donnés par le constructeur du robot, on obtient la position nominale X_0 . En utilisant par ailleurs le vecteur rigide p_{rigide} des paramètres, on obtient la position X_{rigide} 15 pour un certain nombre de configurations. Dans ce vecteur p_{rigide} , seuls θ et α sont variables. Les autres paramètres généralisés, relatifs à la flexibilité, φ_{t1} , φ_{t2} , φ_r , φ_{t2} , φ_{tb} ont une valeur égale à 0 et toutes les raideurs k ont une valeur infinie, ce qui serait le cas d'un système parfaitement rigide. Un but est de déterminer le vecteur p_{opt} des paramètres qui minimise, par exemple, dans le 20 sens des moindres carrés, l'erreur de position $X_m - X_c$ pour un nombre suffisant de configurations, X_m étant imposée comme intrinsèquement liée au robot à calibrer. Les valeurs nominales p_0 des paramètres servent comme point de départ d'un algorithme d'optimisation utilisé. Un algorithme d'optimisation utilisé peut être, par exemple, l'algorithme d'optimisation non 25 linéaire décrit dans l'article de T.F.Coleman and Y.Li « On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds » in Mathematical Programming, Vol. 67, Number 2, 1994, pages 189-224.

30 La troisième étape 3 complète l'étape précédente par une application d'une calibration polynomiale généralisée. La cinématique du robot est notamment définie par des repères liés à la base 28 du robot, aux différents segments 21 et à l'effecteur 22. Le passage d'un repère à un autre se réalise par des matrices de transformation homogène A_i qui sont notamment fonction de la 35 configuration et des paramètres du robot.

Sans correction d'erreur, la position de l'effecteur par rapport à la base du robot X_{C1} est donc calculée selon la relation suivante :

$$X_{C1} = A_1.A_2 \times \dots \times A_N.X_N \quad (7)$$

5

où X_{C1} est la position flexible de l'effecteur 22 par rapport à la base du robot, calculée dans la deuxième étape 2. Ce vecteur représente une position idéale calculée à partir du modèle flexible du robot obtenu à l'étape 2.

10 Comme précédemment, X_N est le vecteur représentant la position de l'effecteur par rapport au dernier segment et A_i , i étant égal à 1, 2, ..., N , est la matrice de transformation homogène flexible de l'articulation d'ordre i .

Pour corriger l'erreur de position des matrices d'erreur généralisées E_i sont intercalée entre chaque matrice de transformation homogène A_i . Des matrices d'erreur généralisées sont notamment décrites dans l'article de 15 M. Meggioalaro, S. Dubowsky et C. Mavroidis « Geometric and elastic error calibration of a high accuracy patient positioning system » in Mechanism and Machine Theory, vol. 40, 2005, pages 415-427. Pour obtenir la nouvelle position X_{C2} la relation (7) est donc corrigée pour obtenir la relation suivante :

$$20 \quad X_{C2} = A_1.E_1.A_2.E_2 \dots A_N.E_N.X_N \quad (8)$$

X_{C2} est la position réelle de l'effecteur par rapport à la base du robot et E_i est la matrice d'erreur généralisée qui suit la matrice de transformation homogène A_i associée au segment d'ordre i .

25 Les matrices d'erreur généralisées E_i sont notamment destinées à corriger l'erreur de position angulaire des axes de rotation de chaque segment. En particulier pour l'articulation du segment d'ordre i , la matrice E_i permet le passage du repère idéal, flexible, au repère réel.

30 La figure 9 illustre les passages entre repères. En particulier la figure 9 présente un repère 91 lié au segment d'ordre $i-1$ ayant son centre en un point O_{i-1} du segment. La matrice de transformation A_i permet de passer du repère 91 lié au segment d'ordre $i-1$ au repère 92 lié au segment d'ordre i ayant son centre en un point O_i de ce segment. Puis la matrice d'erreur 35 généralisée E_i permet de passer de ce repère idéal à un repère réel 92', par

la combinaison d'un mouvement de translation et d'un mouvement de rotation, la translation faisant notamment passer le repère du centre O_i à un centre O'_i .

Les éléments de chaque matrice E_i sont fonction non-linéaire des six paramètres généralisés $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$, trois ce ces paramètres $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ représentant les angles d'Euler correspondant au mouvement de rotation, les trois autres paramètres $\varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$ représentant une translation dans l'espace. Chaque paramètre généralisé est une fonction polynomiale de la géométrie du système poly-articulé formant le robot et donc du vecteur de configuration q .

Selon l'invention, les matrices A_i représentent le modèle flexible du robot et les matrices E_i sont non-linéaires en fonction des paramètres généralisés. En particulier, la matrice E_i peut s'écrire sous la forme suivante :

$$15 \quad E_i = \begin{bmatrix} C\varepsilon_4 C\varepsilon_6 - S\varepsilon_4 S\varepsilon_5 S\varepsilon_6 & -C\varepsilon_4 S\varepsilon_6 - S\varepsilon_4 C\varepsilon_5 C\varepsilon_6 & S\varepsilon_4 S\varepsilon_5 & \varepsilon_1 \\ S\varepsilon_4 C\varepsilon_6 + C\varepsilon_4 C\varepsilon_5 S\varepsilon_6 & -S\varepsilon_4 S\varepsilon_6 + C\varepsilon_4 C\varepsilon_5 C\varepsilon_6 & -C\varepsilon_4 S\varepsilon_5 & \varepsilon_2 \\ S\varepsilon_5 S\varepsilon_6 & S\varepsilon_5 C\varepsilon_6 & C\varepsilon_5 & \varepsilon_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

où $C\varepsilon_i$ représente le cosinus de l'angle d'Euler ε_i et $S\varepsilon_i$ son sinus.

En raison notamment de la structure du parallélogramme, le modèle flexible du robot présente une redondance dans ses paramètres. Il existe des paramètres qui sont fonction d'autres paramètres du modèle. Seuls les paramètres indépendants sont identifiés. Le gradient de la fonction objective définie par la relation (7) peut être développé pour éliminer la dépendance des paramètres. Il permet également d'augmenter la robustesse de la méthode d'optimisation. Une méthode d'optimisation utilisée peut être la méthode des moindres carrés non-linéaire, l'algorithme utilisé étant l'algorithme décrit dans l'article de T.F Coleman et al.

Pour un ensemble de configurations donné, le gradient de la fonction objective devient une matrice W où le nombre m de configurations est plus grand que le nombre de paramètres à identifier. La décomposition de la matrice W donne une matrice triangulaire supérieure R . Les paramètres

indépendants sont par exemple trouvés en utilisant les éléments diagonaux r de la matrice triangulaire R qui vérifient la relation suivante :

$$r > mx \max(|R_{ii}|)x\epsilon \quad (9)$$

5

où R_{ii} est un vecteur formé par les éléments diagonaux de la matrice R et ϵ est la précision de la machine demandée pour le système, $|R_{ii}|$ étant le module du vecteur. Cette méthode d'élimination des paramètres est très précise, en particulier elle cible seulement les paramètres redondants. Elle 10 se fait d'une manière numérique et est très rapide à exécuter.

Avantageusement, la solution proposée par l'invention permet de mieux corriger l'erreur de position sur des robots de grande taille mais aussi sur des robots de petite taille. En particulier, l'invention est applicable pour tous types 15 de robots manipulateur ou de systèmes flexibles.

REVENDICATIONS

1. Procédé de calibration de la position d'un système poly-articulé composé d'une chaîne de N segments (21) reliés entre eux par une liaison articulée (24, 26, 27), la calibration minimisant la différence entre la position mesurée X_m d'un organe (22) lié au dernier segment de la chaîne et sa position calculée X_c , X_c étant égale au produit $A_1.A_2 \dots A_i \dots A_N.X_N$, une matrice A_i de transformation homogène étant associée à chaque segment d'ordre i (21), cette matrice étant fonction de paramètres de configuration (q) du système et de paramètres généralisés donnés (p) caractérisant la flexibilité du segment (21), caractérisé en ce que ledit procédé comporte :
 - 10 - une première étape (1) de calcul d'un modèle flexible du système composé des matrices $A_1, A_2 \dots A_i \dots A_N$;
 - une deuxième étape (2) de calibration du modèle flexible par l'obtention d'un ensemble de paramètres généralisés (p_{opt}) minimisant la différence entre X_m et X_c ;
 - 15 - une troisième étape (3) de calibration polynomiale généralisée du modèle flexible par l'introduction de matrices d'erreur généralisées E_i entre les matrices de transformation homogène dans le modèle flexible, la position calculée X_c étant égale au produit $A_1.E_1.A_2.E_2 \dots A_N.E_N.X_N$, une matrice d'erreur généralisée E_i étant associée à chaque segment d'ordre i, chaque matrice E_i d'un segment étant une fonction polynomiale des paramètres de configuration (q) liés au segment.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que dans la première étape (1) le modèle flexible du système est obtenu par la détermination de nouveaux paramètres généralisés (p) à partir des paramètres rigides du système selon un processus itératif :
 - un modèle géométrique (84) est calculé en fonction de paramètres de configuration (81), de paramètres généralisés d'origine (82) et de propriétés géométriques (83) du système ;
 - des déformations (86) du système sont calculées en fonction du modèle géométrique (84) et de contraintes mécaniques (85) ;
 - de nouveaux paramètres généralisés (87) sont calculés en fonction des déformations (86) ;

- les nouveaux paramètres généralisés (87) sont comparés aux paramètres d'origine (82) ;
 - si la différence ΔP entre les nouveaux paramètres (87) et les paramètres d'origine (82) est inférieure à un seuil ϵ donné, le modèle flexible (90) est obtenu à partir des nouveaux paramètres généralisés (87) ;
- 5 - dans le cas contraire (80), une nouvelle itération est exécutée, cette itération rectifiant le modèle (84) en utilisant les nouveaux paramètres généralisés.

10

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que les contraintes mécaniques comportent des contraintes de flexibilité appartenant aux paramètres généralisés (p).
- 15 4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les paramètres de configuration (q) comportent les angles des axes de rotation (24) et d'élévation (29) par rapport à une référence donnée.
- 20 5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'un segment (21) est modélisé par un parallélogramme (25) et un axe de rotation (24) s'articulant entre deux chapes (26, 27), une première chape (26) appartenant au segment et la deuxième chape (27) appartenant au segment suivant dans la chaîne, le 25 parallélogramme modélisant un mouvement d'élévation autour d'un axe (29) passant par un sommet du parallélogramme, le segment étant soumis à des contraintes de torsion, de compression et de traction.
- 30 6. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que chaque segment (21) est modélisé par les paramètres de flexibilité suivante :
- un ressort (61) de raideur k_{t1} qui représente la torsion de la chape (26) en amont de l'axe de rotation (24) ;
 - un ressort (62) de raideur k_{f1} qui représente la flexion de l'axe de rotation (24) ;

- un ressort (63) de raideur k_r qui représente l'élasticité d'un élément de transmission de mouvement de rotation (42) ;
- un ressort (64) de raideur k_{t2} qui représente la torsion de la chape (27) en aval de l'axe de rotation (24) ;
- 5 - un ressort (65) de raideur k_{tp} qui représente la torsion du parallélogramme (25) ;
- des ressorts (56, 58, 55) de raideur k_{b1} représentant la flexibilité d'un côté (52) du parallélogramme, de raideur k_{tube} représentant la flexibilité du côté opposé (51) et de raideur k_{j1} représentant la flexibilité d'une branche (57) reliant un point (J) du côté adjacent (53) à une extrémité (B) de ce côté (51) ;

10 un modèle de rotation étant obtenu en fonction des paramètres généralisés de flexibilité $\varphi_{t1}, \varphi_{f1}, \theta, \varphi_r, \varphi_{t2}, \alpha, \varphi_{tb}$ représentant respectivement les angles de rotation de des ressorts (61, 62) de raideurs k_{t1}, k_{f1} , l'angle de rotation 15 autour de l'axe de rotation (24), les angles de rotation de des ressorts (63, 64) de raideurs k_r, k_{t2} , l'angle de rotation autour de l'axe d'élévation (29), et l'angle de rotation du ressort (65) de raideur k_{tp} .

20 7. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce qu'un segment (21) comportant un tube (31) équipé d'une bielle (33, 34) et muni à chaque extrémité d'une chape (26, 27), une première chape (26) s'articulant autour de la chape (27) du segment suivant par l'intermédiaire de l'axe de rotation (24), les mouvements de rotation se faisant au moyen de poulies de rotation (32) entraînant un câble de rotation (42), un côté du segment (51) 25 modélise le tube, le côté opposé (52) modélise la bielle, la branche (57) modélise un élément d'équilibrage et l'élément de transmission de mouvement de rotation (42) modélise le câble de rotation.

30 8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que une matrice d'erreur généralisée E_i associée à un segment (21) est une fonction non linéaire de six paramètres $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$, trois de ces paramètres $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ représentant les angles d'Euler correspondant au mouvement de rotation d'un repère (92) lié au segment, les trois autres paramètres $\varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$ représentant une translation dans

l'espace du centre O_i du repère (92), chaque paramètre généralisé est une fonction polynomiale des composantes du vecteur de configuration (q).

9. Procédé selon la revendication 8, caractérisé en ce que la matrice E_i
5 s'écrit sous la forme suivante :

$$E_i = \begin{bmatrix} C\epsilon_4 C\epsilon_6 - S\epsilon_4 S\epsilon_5 S\epsilon_6 & -C\epsilon_4 S\epsilon_6 - S\epsilon_4 C\epsilon_5 C\epsilon_6 & S\epsilon_4 S\epsilon_5 & \epsilon_1 \\ S\epsilon_4 C\epsilon_6 + C\epsilon_4 C\epsilon_5 S\epsilon_6 & -S\epsilon_4 S\epsilon_6 + C\epsilon_4 C\epsilon_5 C\epsilon_6 & -C\epsilon_4 S\epsilon_5 & \epsilon_2 \\ S\epsilon_5 S\epsilon_6 & S\epsilon_5 C\epsilon_6 & C\epsilon_5 & \epsilon_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$C\epsilon_i$ représentant le cosinus de l'angle d'Euler ϵ_i et $S\epsilon_i$ son sinus.

10

15

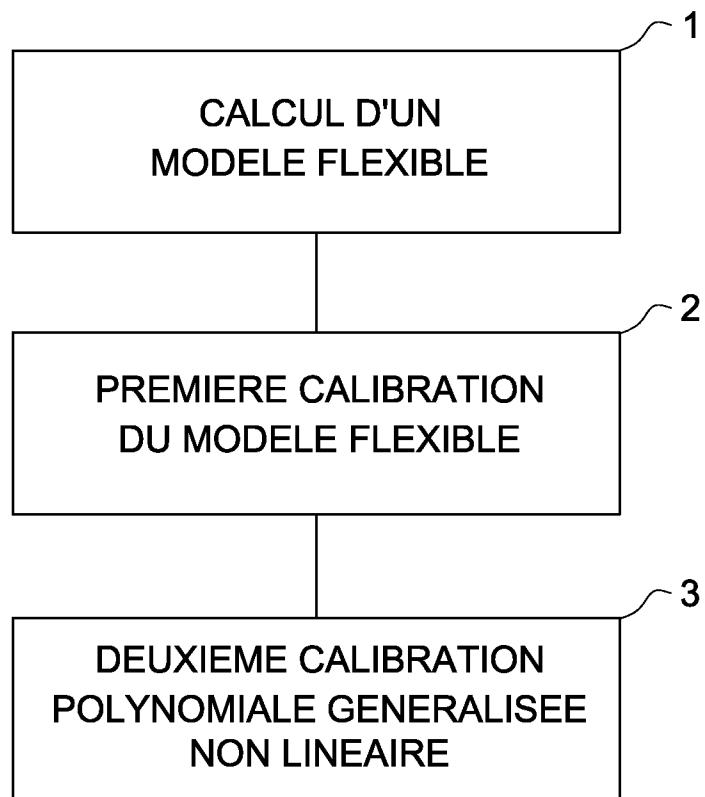


FIG. 1

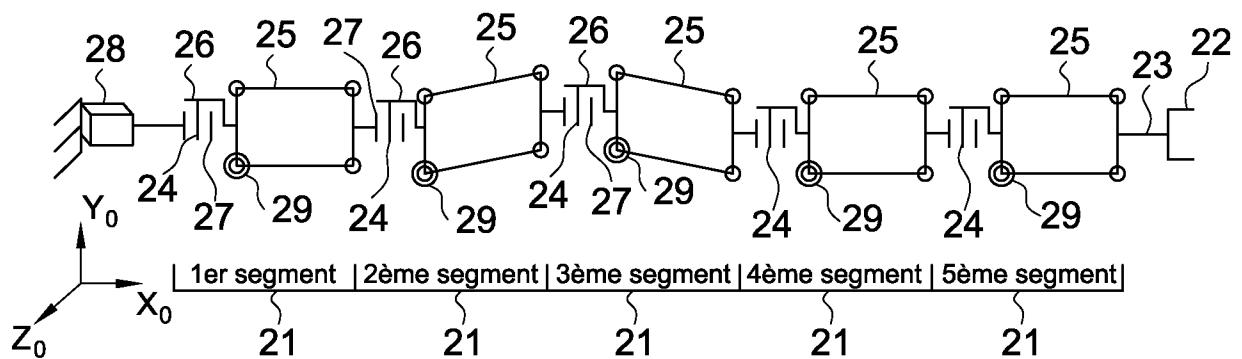


FIG.2

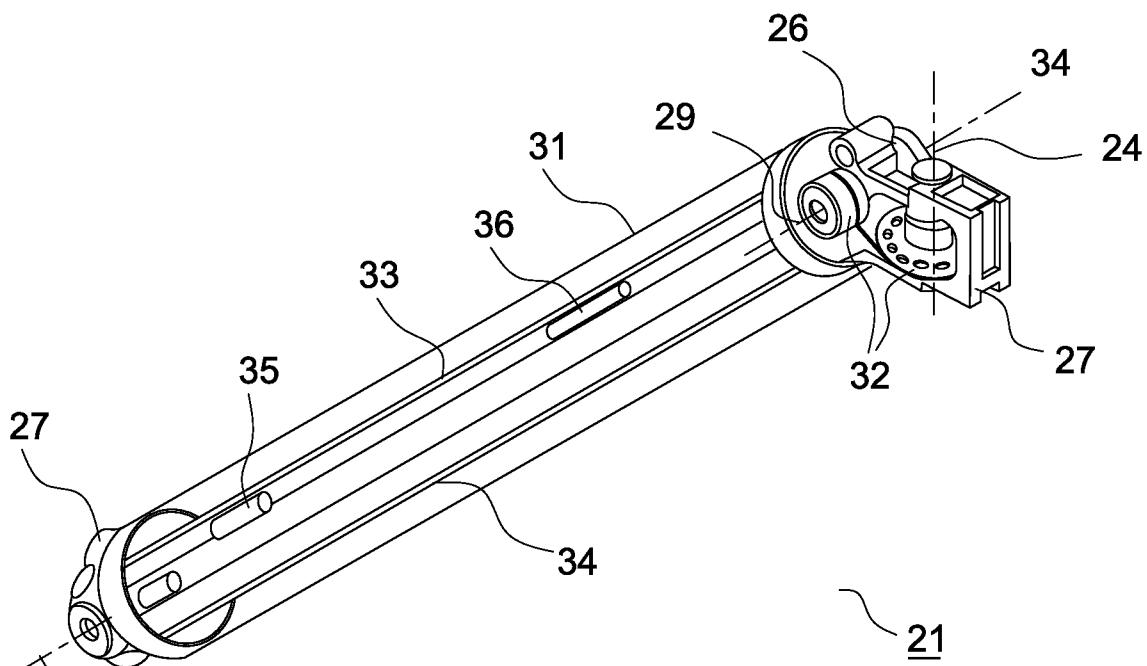


FIG.3

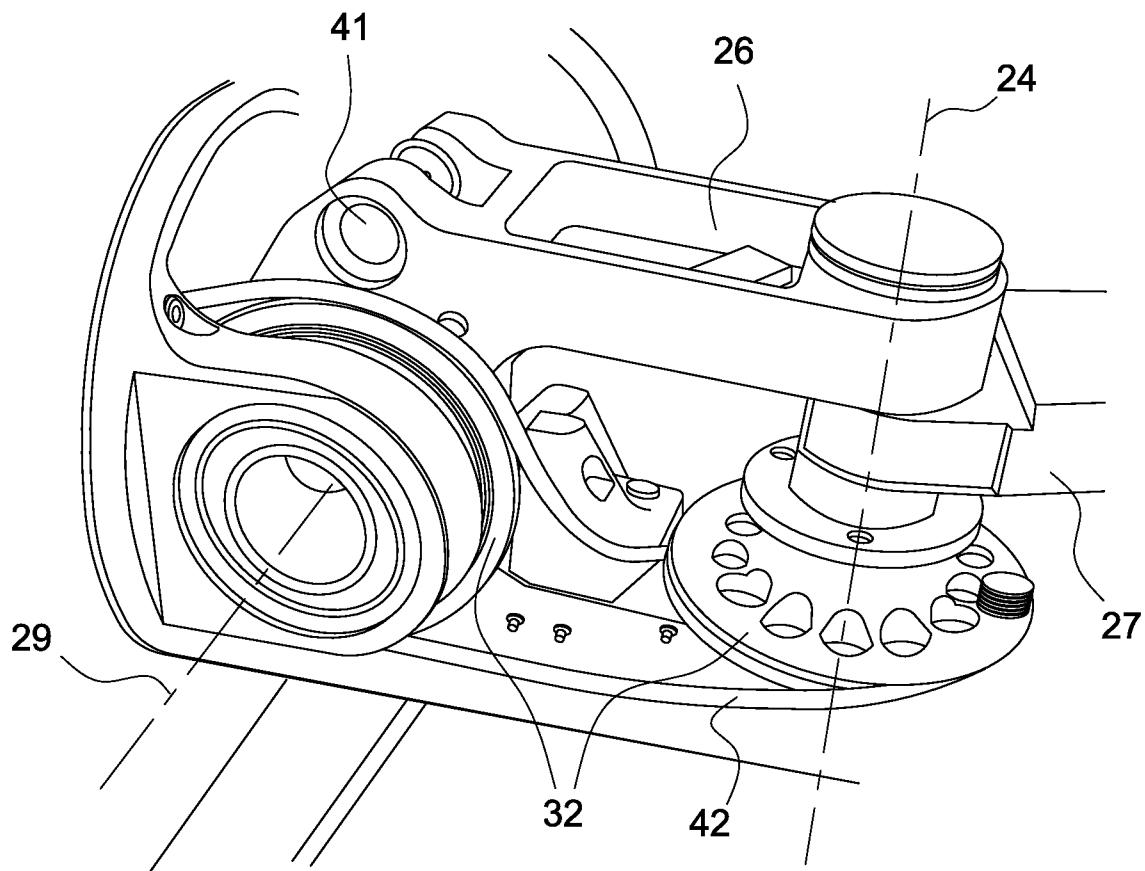


FIG.4

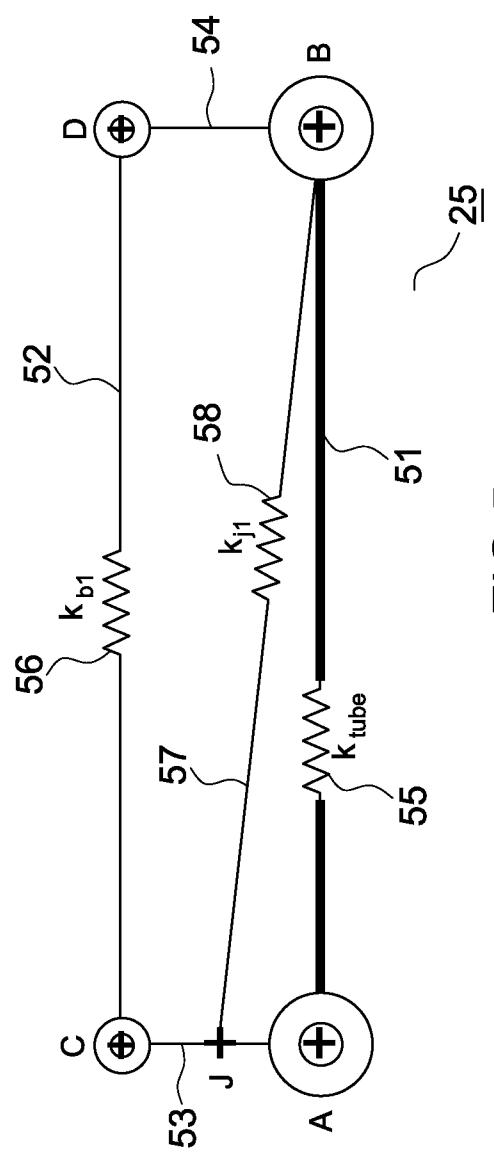


FIG. 5

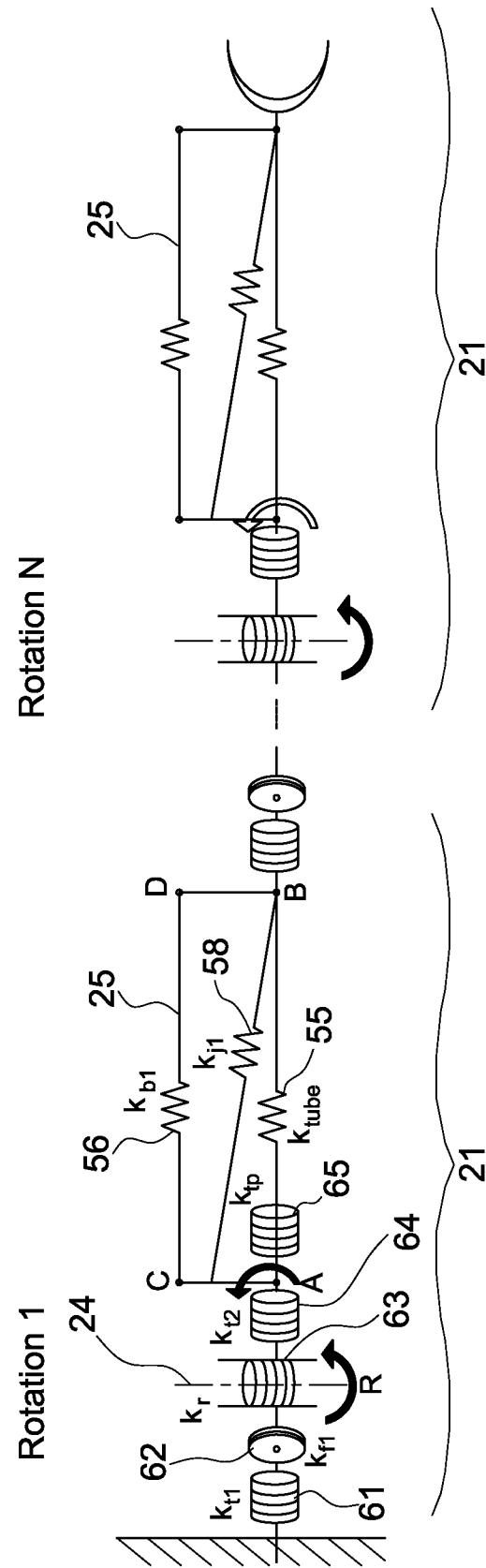


FIG. 6

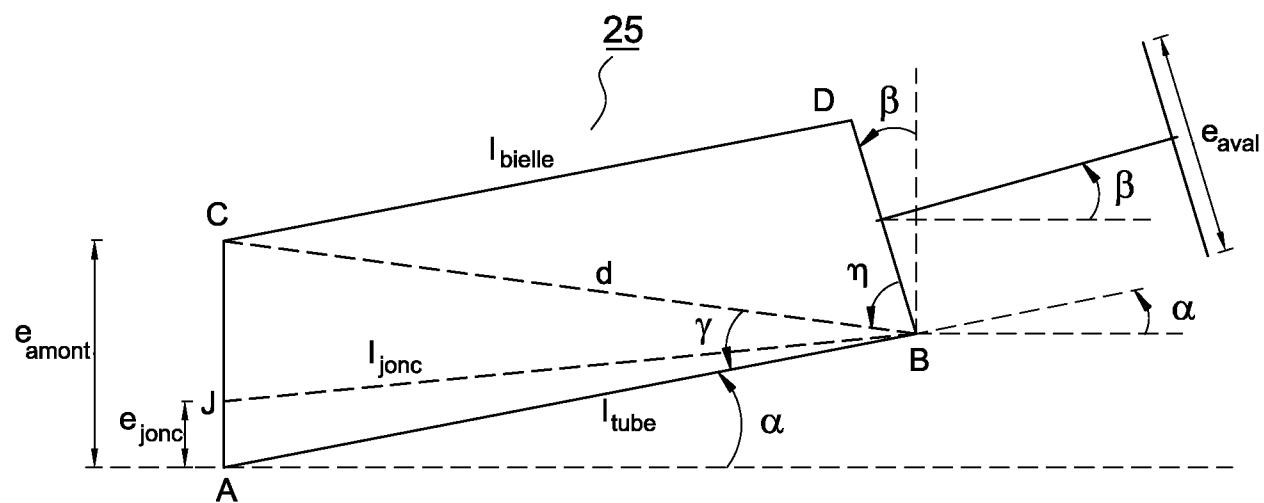


FIG.7

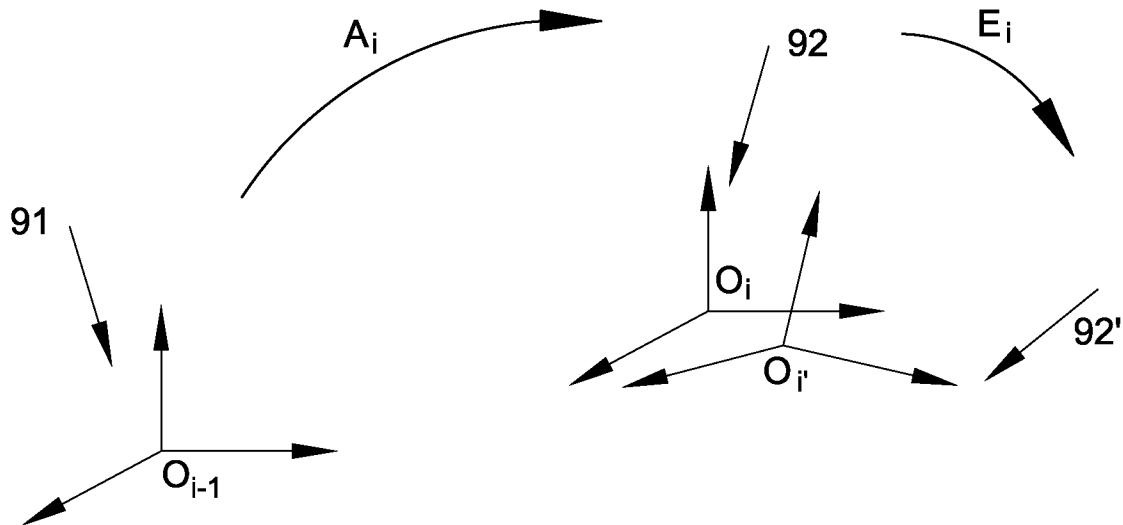


FIG.9

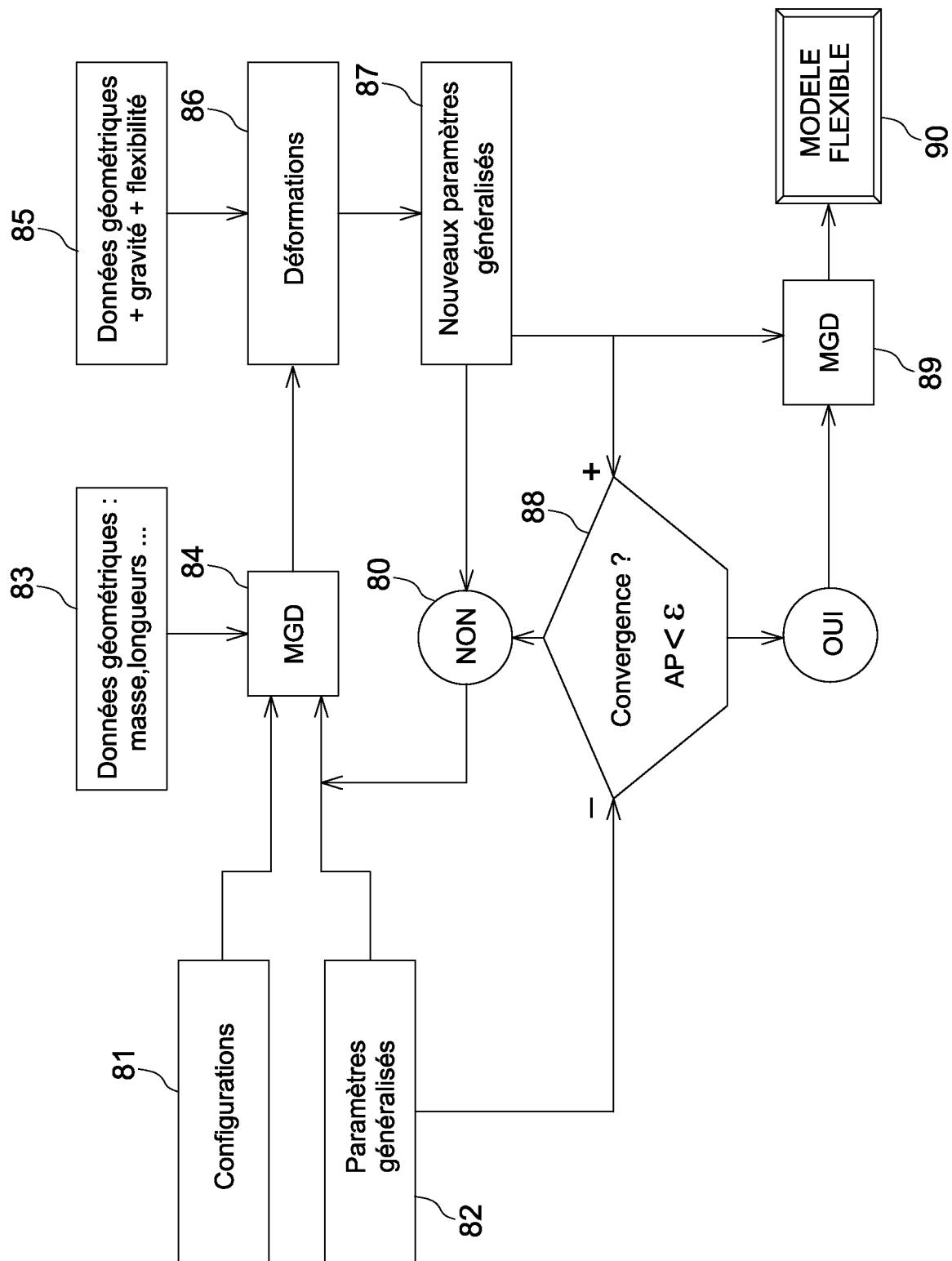


FIG.8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2008/057415

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. B25J9/16

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

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 practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC, COMPENDEX

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>MAVROIDIS C ET AL: "A SYSTEMATIC ERROR ANALYSIS OF ROBOTIC MANIPULATORS: APPLICATION TO A HIGH PERFORMANCE MEDICAL ROBOT" PROCEEDINGS OF THE 1997 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. ALBUQUERQUE, APR. 20 - 25, 1997, PROCEEDINGS OF THE IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, NEW YORK, IEEE, US, vol. VOL. 2 CONF. 14, 20 April 1997 (1997-04-20), pages 980-985, XP000774320 ISBN: 0-7803-3613-5 page 980 - page 985</p> <p style="text-align: center;">-/-</p>	1-9

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 document 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

19 septembre 2008

Date of mailing of the international search report

25/09/2008

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Hauser, Leon

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2008/057415

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KHALIL W ET AL: "Geometric calibration of robots with flexible joints and links" JOURNAL OF INTELLIGENT AND ROBOTIC SYSTEMS: THEORY AND APPLICATIONS KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS NETHERLANDS, vol. 34, no. 4, August 2002 (2002-08), pages 357-379, XP002473837 page 357 - page 379 -----	1-9
A	ZHAO-HUI JIANG ED - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS: "KINEMATICS AND DYNAMICS OF FLEXIBLE SPACE ROBOT ARMS" PROCEEDINGS OF THE IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS. RALEIGH, NC., JULY 7 - 10, 1992, NEW YORK, IEEE, US, vol. VOL. 3, 7 July 1992 (1992-07-07), pages 1681-1688, XP000334019 ISBN: 0-7803-0738-0 page 1681 - page 1688 -----	1-9

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2008/057415

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. B25J9/16

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

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, INSPEC, COMPENDEX

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>MAVROIDIS C ET AL: "A SYSTEMATIC ERROR ANALYSIS OF ROBOTIC MANIPULATORS: APPLICATION TO A HIGH PERFORMANCE MEDICAL ROBOT" PROCEEDINGS OF THE 1997 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. ALBUQUERQUE, APR. 20 - 25, 1997, PROCEEDINGS OF THE IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, NEW YORK, IEEE, US, vol. VOL. 2 CONF. 14, 20 avril 1997 (1997-04-20), pages 980-985, XP000774320 ISBN: 0-7803-3613-5 page 980 - page 985</p> <p>-----</p> <p style="text-align: center;">-/-</p>	1-9

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

19 septembre 2008

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

25/09/2008

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, Tx. 31 651 epo nl,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Hauser, Leon

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2008/057415

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	KHALIL W ET AL: "Geometric calibration of robots with flexible joints and links" JOURNAL OF INTELLIGENT AND ROBOTIC SYSTEMS: THEORY AND APPLICATIONS KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS NETHERLANDS, vol. 34, no. 4, août 2002 (2002-08), pages 357-379, XP002473837 page 357 - page 379	1-9
A	ZHAO-HUI JIANG ED - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS: "KINEMATICS AND DYNAMICS OF FLEXIBLE SPACE ROBOT ARMS" PROCEEDINGS OF THE IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS. RALEIGH, NC., JULY 7 - 10, 1992, NEW YORK, IEEE, US, vol. VOL. 3, 7 juillet 1992 (1992-07-07), pages 1681-1688, XP000334019 ISBN: 0-7803-0738-0 page 1681 - page 1688	1-9