

DISPOSITIF DE GESTION DES DEPLACEMENTS D'UN ROBOT ET ROBOT DE SOIN ASSOCIE

DOMAINE TECHNIQUE

5

L'invention concerne le domaine de la gestion des déplacements d'un robot opérant sur des surfaces de géométries très diverses.

L'invention peut être appliquée dans de nombreux domaines techniques dans
10 lesquelles la surface de travail du robot n'est pas connue a priori. Par exemple, l'invention peut être mise en œuvre pour un robot de peinture de porcelaines artisanales dans lequel le robot doit s'adapter aux différentes formes de la porcelaine réalisées par un artisan.

L'invention trouve une application particulièrement avantageuse pour déplacer un
15 bras motorisé d'un robot de soin, tel qu'un robot de massage.

ART ANTERIEUR

Contrairement aux robots industriels programmés pour suivre une trajectoire
20 prédéterminée, un robot opérant sur une surface inconnue doit comporter des moyens de gestion des déplacements aptes à analyser la surface à traiter pour déterminer une trajectoire.

Les robots de reconnaissance intègrent généralement au moins une caméra et des
25 moyens de traitement d'image pour analyser, au cours du temps, la surface d'exploration et déterminer la trajectoire à suivre pour le robot.

Cette méthode d'analyse d'une surface inconnue nécessite une grande puissance de calcul pour guider précisément les déplacements du robot au cours du temps. Il s'ensuit
30 que les robots d'exploration se déplacent lentement de sorte à permettre au dispositif de gestion des déplacements d'optimiser les déplacements du robot en fonction des informations acquises par la caméra et traitées par les moyens de traitement d'image.

En outre, pour un robot de massage ou pour un robot de peinture de porcelaines
35 artisanales, les déplacements du robot doivent être extrêmement précis pour masser les zones recherchées sur le corps d'un individu ou pour appliquer les couches de peinture aux endroits recherchés.

Pour ce faire, il est connu de scanner une surface en trois dimensions afin de permettre à un opérateur de programmer les déplacements d'un robot en utilisant une modélisation numérique en trois dimensions de la surface à traiter par le robot.

5 Par exemple, la demande de brevet internationale N° WO 2015/187092 décrit un robot de massage intégrant un scanner en trois dimensions pour scanner le corps d'un patient et permettre à un praticien de déterminer la trajectoire de massage du robot en utilisant une projection d'un modèle en trois dimensions du corps d'un patient sur une tablette tactile.

10

Cependant, ce robot de massage n'est pas autonome car un praticien doit être présent pour mettre à profit son savoir-faire et programmer une trajectoire du robot de massage sur un modèle numérique.

15 Le problème technique consiste donc à automatiser la gestion des déplacements d'un robot opérant sur une surface inconnue avec une grande précision de mouvement.

EXPOSE DE L'INVENTION

20 La présente invention vise à répondre à ce problème technique au moyen de plusieurs séquences de déplacements connues pour un modèle générique associées à des moyens d'adaptation d'une surface à traiter avec le modèle générique de sorte à adapter les séquences de déplacements connues pour un modèle générique et les appliquer à la surface à traiter.

25

Ce faisant, bien que la géométrie de la surface à traiter ne soit pas connue lors de la programmation des séquences de déplacements sur le modèle générique, le robot est capable d'adapter automatiquement les séquences de déplacements en adaptant la forme du modèle générique sur la forme de la surface à traiter.

30

A cet effet, selon un premier aspect, l'invention concerne un dispositif de gestion des déplacements d'un robot configuré pour traiter une surface, ledit dispositif comportant :

35 - des moyens d'acquisition d'une représentation en trois dimensions de ladite surface à traiter ; et

- des moyens de détermination d'une séquence de déplacements en fonction de ladite représentation en trois dimensions de ladite surface à traiter.

L'invention se caractérise en ce que lesdits moyens de détermination intègrent au moins un modèle générique en trois dimensions pour lequel plusieurs séquences de déplacements sont connues ; ledit dispositif comportant des moyens d'adaptation dudit modèle générique avec ladite représentation en trois dimensions de ladite surface à traiter
5 aptes à déformer ledit modèle générique pour correspondre à ladite représentation en trois dimensions de ladite surface à traiter, les déformations dudit modèle générique étant appliquées aux séquences de déplacements connues de sorte à obtenir au moins des nouvelles séquences de déplacement adaptées aux dimensions de ladite surface à traiter ; ledit robot étant configuré par traiter ladite surface en fonction d'une des nouvelles
10 séquences de déplacement.

L'invention permet ainsi d'utiliser plusieurs séquences de déplacements connues sur un modèle générique pour les appliquer sur une surface à traiter dont la géométrie n'est pas connue lors de l'apprentissage des séquences de déplacements. Dans l'exemple
15 du robot de peinture de porcelaines artisanales, un peintre peut définir des motifs standards à peindre sur des tasses en enregistrant ces motifs par rapport à un modèle générique d'une tasse standard. Un robot peut alors scanner la surface d'une tasse nouvellement créée et appliquer l'un des motifs standards en déformant le modèle générique en fonction de la surface de la tasse nouvellement créée.

20 Dans l'exemple d'un robot de massage, un modèle générique d'un corps humain est réalisé à partir de mesures sur des personnes réelles. Ce modèle générique est ensuite représenté en trois dimensions de manière à ce qu'un praticien puisse définir une trajectoire de massage en passant par différents points sensibles du modèle générique de
25 sorte à obtenir un effet massant efficace.

Ces points sensibles du modèle générique peuvent correspondre à des zones, par exemple une zone s'étendant dans un rayon de 50 mm autour d'un point sensible dans une direction normale à la surface au niveau de ce point.

30 Lorsque le robot est utilisé pour masser un nouveau patient, le corps du patient est scanné et la forme du modèle générique est adaptée sur la forme du patient de sorte que la déformation du modèle générique permette d'obtenir une déformation de la trajectoire de massage afin d'adapter les déplacements du robot avec la forme du corps du patient tout
35 en respectant la précision de massage enregistrée par le praticien. Il s'ensuit que l'invention permet de reproduire une qualité de massage de très haut niveau avec une sensation de massage très proche, voire identique, à celle d'un praticien.

Selon l'invention, plusieurs trajectoires de massage peuvent être numérisées pour effectuer plusieurs types de massage distincts. Plusieurs modèles génériques peuvent également être réalisés pour améliorer l'adaptation du modèle générique avec le corps du patient, par exemple en utilisant trois types de modèles génériques pour chaque genre :

5 une personne de grande, de petite et de taille moyenne et pour différentes classes d'âges : enfants, adolescents et adultes.

Selon un mode de réalisation, au moins une séquence de déplacements connue intègre des positions pour lesquelles des actions sont préprogrammées pour ledit robot.

10

Ce mode de réalisation permet de commander le fonctionnement d'actionneurs lors des déplacements du robot. Dans l'exemple du robot de peinture de porcelaines artisanales, le robot peut effectuer des traitements de surface spécifiques à certains endroits. Dans l'exemple du robot de massage, certaines positions du robot peuvent

15 commander le déclenchement de moyens de chauffage pour améliorer le confort et/ou l'effet du massage. De plus, la séquence de déplacements connue peut comporter plusieurs trajectoires réalisées avec un mouvement de palper-rouler alors que d'autres déplacements sont effectués avec un autre type de mouvement.

20 Selon un mode de réalisation, ledit modèle générique et ladite représentation en trois dimensions de ladite surface à traiter étant formalisés sous la forme de nuages de points, lesdits moyens d'adaptation comportent :

- des moyens de calcul d'une direction normale à chaque point de ladite représentation en trois dimensions de ladite surface à traiter ; et
- 25 - des moyens de recherche, pour chaque point du nuage de points de ladite représentation en trois dimensions, du point du modèle générique dans un voisinage proche pour lequel la différence entre la direction normale du point du modèle générique et la direction normale du point d'intérêt est la plus faible ;
- des moyens de détermination d'une distance entre ledit point détecté du modèle
- 30 générique et ledit point d'intérêt ; et
- des moyens de recherche d'une transformation globale du modèle en fonction des distances déterminées pour l'ensemble des points du nuage de points de ladite représentation en trois dimensions.

35 Les directions normales permettent d'obtenir une information relative à l'orientation des faces du modèle générique et de la représentation en trois dimensions de la surface à traiter. Contrairement à une simple comparaison de coordonnées point à point, une comparaison des faces permet d'obtenir une reconnaissance plus efficace.

En outre, l'adaptation du modèle générique est réalisée pas à pas en modifiant petit à petit le modèle générique en fonction de la moyenne des distances. Il s'ensuit que ce mode de réalisation permet d'adapter efficacement le modèle générique en comparant les directions normales de chaque point du modèle générique et les directions normales de la
5 représentation en trois dimensions de la surface à traiter.

Selon un mode de réalisation, lesdits moyens de recherche sont configurés pour rechercher les points du modèle générique dans une sphère prédéfinie autour du point d'intérêt. Ce mode de réalisation vise à limiter la zone de recherche des points du modèle
10 générique de sorte à limiter le temps de calcul. En outre, la limitation de la zone de recherche permet également de limiter l'amplitude de la modification du modèle générique entre deux comparaisons de sorte à augmenter la précision de la modification du modèle générique.

15 Selon un mode de réalisation, les directions normales sont déterminées par construction d'une face au moyen des coordonnées des trois ou quatre points les plus proches du point d'intérêt.

Ce mode de réalisation permet de construire efficacement les faces du modèle
20 générique et de la représentation en trois dimensions de la surface à traiter.

Selon un mode de réalisation, lesdits moyens d'adaptation comportent :

- des moyens de détection de points caractéristiques sur ladite représentation en trois dimensions ; et
- 25 - des moyens de déformation du modèle générique en rotation et/ou en translation de sorte que ladite position desdits points caractéristiques corresponde à une position de points caractéristiques du modèle générique.

Ce mode de réalisation permet de réaliser une première adaptation grossière du
30 modèle générique afin d'améliorer la rapidité de l'adaptation précise réalisée par l'intermédiaire des normales. Dans l'exemple du robot de peinture de porcelaines artisanales, les points caractéristiques peuvent correspondre aux extrémités supérieures et inférieures de la porcelaine. Dans l'exemple du robot de massage, les points caractéristiques peuvent correspondre à l'extrémité supérieure du crâne, à la position des
35 aisselles et à la position de l'entrejambe.

Selon un mode de réalisation, lesdits moyens d'acquisition comportent des moyens de pré-traitement de ladite représentation en trois dimensions au moyen de la capture de plusieurs représentations en trois dimensions et de la réalisation d'une moyenne des coordonnées des points entre les différentes représentations en trois dimensions. Ce mode
5 de réalisation permet d'améliorer la précision de la représentation en trois dimensions et donc de l'adaptation du modèle générique.

Selon un mode de réalisation, lesdits moyens de pré-traitement réalisent un filtrage de ladite moyenne des coordonnées des points entre les différentes représentations en
10 trois dimensions.

Ce mode de réalisation permet également d'améliorer la précision de la représentation en trois dimensions et, donc, de l'adaptation du modèle générique.

15 Selon un second aspect, l'invention concerne un robot de soin comportant :
- un bras articulé ;
- un effecteur disposé à une extrémité du bras articulé ;
- un dispositif de capture d'images en trois dimensions ; et
- un dispositif de gestion des déplacements selon le premier aspect de l'invention.

20 Ce second aspect de l'invention concerne un robot de soin pour lequel la précision des déplacements du robot est un critère essentiel pour éviter de blesser le patient.

Selon un mode de réalisation, lesdits moyens d'acquisition sont disposés sur ledit
25 bras articulé ou sur ledit effecteur. Ce mode de réalisation permet de déplacer les moyens d'acquisition pour acquérir précisément la représentation en trois dimensions.

DESCRIPTION SOMMAIRE DES FIGURES

30 La manière de réaliser l'invention ainsi que les avantages qui en découlent, ressortiront bien du mode de réalisation qui suit, donné à titre indicatif mais non limitatif, à l'appui de la figure 1 qui constitue un ordinogramme des étapes de fonctionnement d'un dispositif de gestion des déplacements d'un robot de massage selon un mode de réalisation de l'invention.

35 L'invention est décrite en référence à un robot de massage de sorte à montrer la capacité d'adaptation du robot car il est évident que les surfaces des corps humains présentent de grandes disparités.

Cependant, l'invention n'est pas limitée à cette application spécifique et elle peut être utilisée pour plusieurs robots travaillant sur une surface dont la géométrie n'est pas prédéterminée et pour lesquels des déplacements précis du robot doivent être réalisés.

5 DESCRIPTION DETAILLÉE DE L'INVENTION

Tel qu'illustré sur la figure 1, l'analyse de la surface à traiter est réalisée par des moyens d'acquisition **14** aptes à fournir une représentation en trois dimensions **Re** de la surface à traiter.

10

La représentation en trois dimensions **Re** prend la forme d'un nuage de points dans lequel chaque point présente trois coordonnées d'un système orthonormée : x, y et z.

Ces moyens d'acquisition **14** peuvent correspondre à un ensemble de capteurs
15 photographiques, un ensemble de capteurs infrarouges, un capteur tomographique, un capteur stéréoscopique ou tout autre capteur connu permettant d'acquérir une représentation en trois dimensions d'une surface.

Par exemple, la caméra Kinect® de la société Microsoft® peut être utilisée pour
20 obtenir cette représentation en trois dimensions **Re**.

Pour obtenir cette représentation en trois dimensions **Re** sans capter l'environnement, il est possible de capter un premier nuage de points correspondant à l'environnement et un second nuage de points correspondant à la surface à traiter dans
25 son environnement. Seuls les points différents entre les deux nuages de points sont conservés de sorte à extraire de l'environnement les points correspondant à la surface à traiter. Cette méthode permet de s'abstraire d'un environnement standardisé pour l'enregistrement et de s'adapter à n'importe quel environnement.

30 Tel qu'illustré sur la figure 1, ces capteurs **14** sont souvent mis en œuvre avec des moyens de pré-traitement **15** afin de fournir une représentation en trois dimensions **Re** avec une qualité ou une précision améliorée. Par exemple, les moyens de pré-traitement **15** peuvent correspondre à un algorithme d'égalisation d'histogrammes, de filtrage, de moyennage de la représentation sur plusieurs représentations successives...

35

Par exemple, il est possible d'utiliser l'approche décrite dans la publication scientifique « KinectFusion: Real-time 3D Reconstruction and Interaction Using a Moving Depth Camera* » publiée le 16 octobre 2011 dans UIST'11.

Le dispositif met ensuite en œuvre des traitements informatiques afin d'adapter un modèle générique **m1**, **m2**, **m3** avec la représentation en trois dimensions **Re** de sorte à reporter sur la représentation en trois dimensions **Re** des séquences de déplacements **Tx** préprogrammées sur chaque modèle générique **m1**, **m2**, **m3**. Par exemple, les séquences
5 de déplacements **Tx** peuvent être projetées sur le second nuage de points correspondant à la surface à traiter. En outre, ces séquences de déplacements **Tx** peuvent comporter des positions pour lesquelles des actions sont préprogrammées pour ledit robot.

Les modèles génériques **m1**, **m2**, **m3** sont également formalisés sous la forme d'un
10 nuage de points dans lequel chaque point présente trois coordonnées d'un système orthonormé : x, y et z. De préférence, le modèle générique est composé par un modèle moyen **ModMoy** de N vertex de trois coordonnées et d'une matrice de déformation **ModSigma** de M composantes morphologiques par 3N coordonnées, c'est-à-dire trois coordonnées pour N vertex.

15

Un grand nombre de personnes différentes sont nécessaires pour enrichir chaque modèle générique **m1**, **m2**, **m3**, par exemple milles personnes.

Une analyse en composantes principales est appliquée pour réduire la dimension
20 des données. En appliquant une analyse en composantes principales sur ces données, il est possible de déterminer la variance dans les données et d'associer la variance commune sur une composante. Ainsi, au lieu de conserver une composante par personne, chaque modèle générique **m1**, **m2**, **m3** stocke une vingtaine de composantes qui vont expliquer la majorité de la variance pour les mille personnes.

25

Cette méthode est décrite plus longuement dans la publication scientifique « Building Statistical Shape Spaces for 3D Human Modeling, Pishchulin & all » publiée le 19 mars 2015 dans la revue « Published in Pattern Recognition 2017 ».

30 De préférence, les modèles génériques **m1**, **m2**, **m3** sont stockés dans une mémoire accessible par les moyens de traitement d'image du dispositif aptes à réaliser l'adaptation d'un modèle générique **m1**, **m2**, **m3** avec la représentation en trois dimensions **Re**.

Pour ce faire, lorsque la représentation en trois dimensions **Re** est obtenue, le
35 dispositif met en œuvre une détection des points caractéristiques **Pref** de cette représentation en trois dimensions **Re** par des moyens de traitement numérique 16. Sur l'exemple de la figure 1, les points caractéristiques **Pref** correspondent à l'extrémité supérieure du crâne, à la position des aisselles et à la position de l'entrejambe. Ces

moyens de traitement numérique **16** peuvent mettre en œuvre toutes les méthodes connues pour détecter des éléments sur une image, telles que la méthode de Viola et Jones par exemple.

- 5 De préférence, pour détecter les points caractéristiques **Pref**, le nuage de points est transformé en une image de profondeur c'est-à-dire une image en niveaux de gris, par exemple codée sur 12 bits permettant de coder des profondeurs allant de 0 à 4095 mm. Cette image de profondeur est ensuite seuillée et binarisée pour ne faire ressortir avec une valeur 1 les pixels correspondants à l'objet/corps d'intérêt et avec une valeur 0 les pixels
10 correspondants à l'environnement. Ensuite, une détection de contour est appliquée sur cette image binarisée en utilisant, par exemple, la méthode décrite dans Suzuki, S. and Abe, K., Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following, CVGIP 30 1, pp 32-46 (1985). Les points saillants du contour et ses défauts de convexité (déterminés en utilisant, par exemple, la méthode Sklansky, J., *Finding the*
15 *Convex Hull of a Simple Polygon*. PRL 1 \$number, pp 79-83 (1982)) sont utilisés comme points caractéristiques **Pref**.

- Des moyens de sélection **17** du modèle générique **m1, m2, m3** sont ensuite mis en œuvre pour sélectionner le modèle générique **m1, m2, m3** le plus proche de la
20 représentation en trois dimensions **Re**.

- Par exemple, cette sélection peut être réalisée en calculant la distance entre le point caractéristique **Pref** du sommet du crâne et le point caractéristique de l'entrejambe de sorte à estimer grossièrement la taille en hauteur de la représentation en trois dimensions
25 **Re** et en sélectionnant le modèle générique **m1, m2, m3** pour lequel la taille en hauteur est la plus proche. De même ou en complément, la sélection du modèle générique **m1, m2, m3** peut être réalisée en utilisant la largeur de la représentation en trois dimensions **Re** en calculant la distance entre les points caractéristique **Pref** des aisselles.

- 30 En outre, le modèle générique **m1, m2, m3** peut être articulé grâce à des os virtuels représentant les os les plus importants du squelette humain. Par exemple, quinze os virtuels peuvent être modélisés sur le modèle générique **m1, m2, m3** pour définir la position et la forme de la colonne vertébrale, des fémurs, des tibias, des cubitus, des humérus et du crâne. L'orientation de ces os virtuels permet de définir la pose du modèle
35 générique, c'est-à-dire si le modèle générique **m1, m2, m3** a un bras en l'air, les jambes écartées...

Cette pose du modèle générique **m1**, **m2**, **m3** peut également être déterminée par les moyens de sélection **17** en comparant la distance (calculée, par exemple, en utilisant la méthode Hu. *Visual Pattern Recognition by Moment Invariants*, IRE Transactions on Information Theory, 8:2, pp. 179-187, 1962.)) entre le contour de l'image de profondeur de l'objet/corps d'intérêt avec une base de données de contours d'images de profondeur du modèle générique dans plusieurs milliers de postures. L'image de profondeur du modèle générique **m1**, **m2**, **m3** articulé la plus proche de l'image de profondeur de l'objet/corps d'intérêt est sélectionnée et les valeurs de rotations des os virtuels sauvegardées.

10

Une première adaptation est ensuite réalisée par des moyens d'adaptation **18** en déformant le modèle générique sélectionné pour s'approcher de la représentation en trois dimensions **Re**. Par exemple, cette première adaptation peut simplement déformer en largeur et en hauteur le modèle générique sélectionné pour que l'écartement des points caractéristiques **Pref** du modèle générique sélectionné corresponde à l'écartement des points caractéristiques **Pref** de la représentation en trois dimensions **Re**.

Cette première adaptation peut également définir la pose des os virtuels du modèle générique **m1**, **m2**, **m3**.

20

Lorsque le modèle générique est adapté, c'est-à-dire que la position des vertex est modifiée, la position des points de la séquence de déplacements **Tx** préprogrammée sur le modèle générique est adaptée de la même manière.

25 Suite à cette première adaptation assez grossière, il est possible d'utiliser une seconde adaptation plus précise en utilisant les directions normales formées par chaque surface définie entre les points de la représentation en trois dimensions **Re**.

Pour ce faire, le dispositif intègre des moyens de calcul des normales **19** de chaque surface de la représentation en trois dimensions **Re** et du modèle générique sélectionné. Par exemple, les directions normales peuvent être déterminées par construction de chaque face de la représentation en trois dimensions **Re** au moyen des coordonnées des trois ou quatre points les plus proches du point d'intérêt. En variante, les directions normales du modèle générique peuvent être calculées lors de l'étape de définition du modèle générique. En variante, les deux adaptations peuvent être réalisées simultanément dans une seule et même étape.

30
35

Le dispositif utilise ensuite des moyens de recherche **20** aptes à détecter, pour chaque point du nuage de points de la représentation en trois dimensions **Re**, le point du modèle générique sélectionné dans un voisinage proche pour lequel la différence entre la direction normale du point du modèle générique et la direction normale du point d'intérêt est la plus faible. Lorsque les os virtuels sont une composante du modèle générique sélectionné, les moyens de recherche **20** adaptent la position et la taille des os virtuels en faisant varier les caractéristiques de chaque os virtuel pour adapter les os virtuels avec la position des éléments du corps présent sur la représentation en trois dimensions **Re**.

10 Par exemple, les moyens de recherche **20** peuvent être configurés pour rechercher les points du modèle générique dans une sphère prédéfinie autour du point d'intérêt. De préférence, le rayon de cette sphère est déterminé en fonction du nombre de vertex du modèle générique et de la taille de l'objet/corps d'intérêt de telle façon qu'une dizaine des points soit inclus dans cette sphère.

15 A l'aide de l'ensemble de ces directions normales, le dispositif peut ensuite calculer la différence du modèle générique sélectionné avec la représentation en trois dimensions **Re** en utilisant des moyens de détermination **21** aptes à calculer la distance entre les points d'intérêts et les points détectés par les moyens de recherche sur le modèle
20 générique sélectionné. L'ensemble de ces distances forme des vecteurs de transformations qu'il faudrait appliquer au point d'intérêt pour qu'il corresponde au point détecté.

Des moyens de recherche **22** visent à déterminer une moyenne de ces vecteurs de transformation de sorte à obtenir une transformation globale du modèle générique
25 sélectionné.

En d'autres termes, en considérant un nouveau vecteur de transformation **CompVec** de M composantes, il est possible de connaître la configuration en trois dimensions des vertex **Pts3D** en appliquant la formule suivante:

30
$$\mathbf{Pts3D} = \mathbf{ModMoy} + \mathbf{CompVec} * \mathbf{ModSigma}$$

Pour une configuration **Pts3D** inconnue, pour un nouveau patient par exemple, le but est de chercher les valeurs des composantes morphologiques **DiffMod** qui correspondent à cette personne connaissant le modèle moyen **ModMoyen** et la matrice de
35 déformation **ModSigma**.

Pour ce faire, les moyens de recherche **22** calculent la différence entre la configuration en trois dimensions des vertex **Pts3D** et le modèle moyen **ModMoyen** ainsi que la matrice pseudo inverse **ModSigmaInv** de **ModSigma**. Par exemple, la matrice pseudo inverse **ModSigmaInv** peut être calculée en décomposant en valeurs singulières

5 la matrice **ModSigma** en utilisant les relations suivantes :

$$\mathbf{ModSigma} = \mathbf{U} \mathbf{E} \mathbf{V}^* ;$$

$$\mathbf{ModSigmaInv} = \mathbf{V} \mathbf{E}^t \mathbf{U}^* ;$$

avec $\mathbf{E}^t$ correspondant à la matrice transposée de $\mathbf{E}$;

$\mathbf{V}^*$ étant la matrice transconjuguée de $\mathbf{V}$; et

10 $\mathbf{U}^*$ étant la matrice transconjuguée de $\mathbf{U}$.

A l'aide de ces données, les moyens de recherche **22** calculent les composantes morphologiques **DiffMod** avec la formule suivante :

$$\mathbf{DiffMod} * \mathbf{ModSigmaInv} = \mathbf{CompVec} * \mathbf{ModSigma} * \mathbf{ModSigmaInv}$$

15

Soit, $\mathbf{CompVec} = \mathbf{DiffMod} * \mathbf{ModSigmaInv}$ qui permet également d'obtenir les composantes morphologiques **DiffMod** pour un patient spécifique.

Le vecteur de transformation **CompVec** est ensuite appliqué au modèle générique
20 sélectionné, la pose est de nouveau estimée comme précédemment et le modèle générique ajusté si nécessaire et une nouvelle recherche est effectuée jusqu'à ce que le modèle générique soit assez proche de la représentation en trois dimensions **Re**. La boucle s'arrête lorsque la distance euclidienne moyenne entre tous les vertex du modèle générique et leurs correspondants sur le nuage de points est inférieure à un seuil défini en
25 fonction du nombre de vertex du modèle générique et de la taille de l'objet/corps d'intérêt, 2 mm par exemple, ou lorsqu'un nombre d'itérations maximum, 100 itérations par exemple, est atteint alors que la distance moyenne inférieure au seuil n'est pas atteinte.

30 De la même manière que précédemment, lorsque le modèle générique est adapté, c'est-à-dire que la position des vertex est modifiée, la position des points de la séquence de déplacements **Tx** préprogrammée sur le modèle générique est adaptée de la même manière.

35 Une phase de calibration entre le capteur **14** et le robot doit souvent être effectuée. En effet, les séquences de déplacements **Tx** sont définies sur le modèle générique **m1**, **m2**, **m3** dans le repère orthonormé du capteur **14** et le robot reçoit des commandes dans son repère orthonormé qui diffère de celui du capteur **14**. Pour calibrer le capteur de

vision **14** et le robot, il est possible d'enregistrer les coordonnées d'au moins trois points communs dans les deux repères. En pratique, un nombre de points **N** supérieur à trois est préférentiellement utilisés. Le robot est déplacé sur la zone de travail et s'arrête **N** fois. A chaque arrêt, la position du robot est enregistrée en calculant les déplacements effectués
 5 par la consigne de déplacement du robot et une détection permet de connaître la position en trois dimensions de cet arrêt au moyen du capteur de vision **14**.

A la fin de ces **N** arrêt, les coordonnées des **N** points sont connues dans les deux repères. Le barycentre de la distribution des **N** points dans les deux repères est déterminé
 10 en utilisant les relations suivantes :

$\text{BarycentreA} = 1/N \text{ somme}(\text{PA}(i))$ pour $i=1$ à **N** avec **PA**(*i*) un point dans le repère du capteur **14** ; et

$\text{BarycentreB} = 1/N \text{ somme}(\text{PB}(i))$ pour $i=1$ à **N** avec **PB**(*i*) un point dans le repère du robot.

15

La matrice de covariance **C** est ensuite déterminée par la relation suivante :

$\text{C} = \text{somme}((\text{PA}(i) - \text{BarycentreA})(\text{PB}(i) - \text{BarycentreB})^t)$ pour $i=1$ à **N**

Cette matrice de covariance **C** est ensuite décomposée en valeurs singulières :

20 $\text{C} = \text{U E V}^*$

La matrice de rotation **R** entre les deux repères est alors obtenue par la relation suivante :

$\text{R} = \text{V U}^t$; si le déterminant de **R** est négatif, il est possible de multiplier la
 25 troisième colonne de la matrice de rotation **R** par -1.

La translation à appliquer entre les deux repères est déterminée par la relation suivante :

30 $\text{T} = -\text{R} * \text{BarycentreA} + \text{BarycentreB}$

Il est ainsi possible de convertir n'importe quel point du repère du capteur **14** **Pa** dans le repère du robot **Pb** en appliquant la relation suivante :

$\text{Pb} = \text{R} * \text{Pa} + \text{T}$

35 L'invention permet ainsi de programmer plusieurs séquences de déplacements **Tx** sur un ou plusieurs modèle génériques **m1-m3** et d'adapter efficacement ces modèles génériques **m1-m3** pour reproduire précisément les séquences de déplacements **Tx** sur

une surface dont la géométrie n'est pas connue lors de l'apprentissage des séquences de déplacements **T_x**.

Le robot peut ainsi suivre une séquence de déplacement **T_x** sélectionnée par
5 l'utilisateur ou par un opérateur. Une séquence de déplacement **T_x** peut être plus
complexe qu'un simple ensemble de points et elle peut comporter différents paramètres
destinés à mettre en œuvre la séquence de déplacement **T_x**, tels que la vitesse d'exécution
ou la pression d'exécution. En outre, la séquence de déplacement **T_x** peut comporter des
positions pour lesquelles des actions sont préprogrammées pour le robot, tels que
10 l'application d'une vibration, d'une aspiration ou d'une température.

Les actions ou les paramètres de la séquence de déplacement **T_x** sélectionnée
peuvent également être ajustables par l'utilisateur ou l'opérateur avant ou pendant la
réalisation de la séquence de déplacement par le robot. Ainsi, dans l'exemple du robot de
15 peinture de porcelaines artisanales, l'opérateur peut régler la vitesse de peinture et la
puissance d'appui du pinceau sur la porcelaine. Dans l'exemple du robot de massage,
l'utilisateur peut choisir lui-même la vitesse et la force du massage en réglant la pression
du robot en temps réel, pour adapter ces paramètres à ses sensations. Il peut également
régler une température émise par la main de massage ou les effets réalisés par cette main
20 de massage, tels que la puissance de vibration ou d'aspiration.