



HAL
open science

Comparaison des performances de deux robots sphériques à architecture sérielle et parallèle selon des critères géométriques et cinématiques

Christophe Drouin, Sylvain Miossec, Gérard Poisson, Laurence Nouaille

► **To cite this version:**

Christophe Drouin, Sylvain Miossec, Gérard Poisson, Laurence Nouaille. Comparaison des performances de deux robots sphériques à architecture sérielle et parallèle selon des critères géométriques et cinématiques. 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-00657062

HAL Id: hal-00657062

<https://hal.science/hal-00657062>

Submitted on 5 Jan 2012

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

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

Comparaison des performances de deux robots sphériques à architecture sérielle et parallèle selon des critères géométriques et cinématiques

C. DROUIN^a, S. MIOSSEC^a, G. POISSON^a, L. NOUAILLE^a

a. Laboratoire PRISME, Université d'Orléans, IUT de Bourges, 63 Avenue de Lattre de Tassigny, 18020 BOURGES

Résumé :

Dans cet article, nous comparons les performances géométriques et cinématiques d'un robot sériel et d'un robot parallèle utilisés comme portes-sonde pour une application de télé-échographie. Le premier est un poignet sphérique sériel à trois articulations rotoïdes concourantes, le second présente une structure à parallélogrammes déformables. Nous comparons leurs performances cinématiques et leur encombrement sur un espace de travail ciblé.

Abstract :

In this document, we compare the geometrical and kinematic performances of a serial and parallel robot, used as probe-holder for the tele-echography application. The first one is a serial spherical wrist with three rotational degrees of freedom and the structure of the second one is composed of two parallelograms. We compare their kinematic performances and bulkiness for a given workspace.

Mots clefs : robots médico-chirurgicaux ; synthèse de mécanisme ; conception optimale

1 Introduction

Depuis 1995, l'équipe Systèmes Robotiques Interactifs du laboratoire PRISME de l'université d'Orléans a conçu et testé en conditions réelles plusieurs robots de télé-échographie, application médicale dont l'objectif premier est de permettre à un médecin d'ausculter à distance un patient situé dans une zone accidentée, inaccessible ou trop éloignée d'un centre médical (Figure 1).

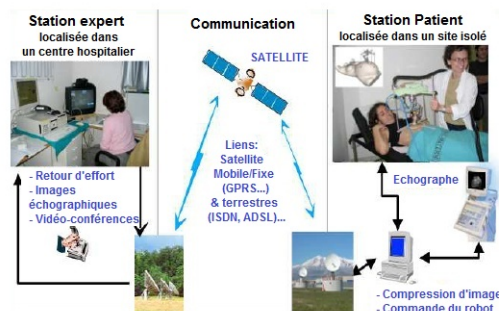


FIGURE 1 – Schéma de principe de la télé-échographie

Six robots ont été développés, le sixième (Figure 2) étant le fruit d'un travail d'optimisation en termes de compacité et de performances cinématiques [3]. D'une génération à une autre, la structure cinématique était assez similaire, un robot sériel sphérique 3R à axes rotoïdes concourants.

Le robot Prosit2, actuellement en phase de conception dans le cadre du projet ANR Prosit et du pôle de compétitivité S2E2, est un mécanisme concurrent et vise à améliorer significativement les performances cinématiques obtenues jusqu'alors avec le robot sphérique. Il s'agit d'une architecture parallèle à base de parallélogrammes déformables (Figure 3) qui s'inspire d'une autre structure, conçue par Najafi [4]. Par rapport à celui-ci, Prosit2 est une structure portable : la structure de Najafi ne peut pas être utilisée en dehors d'un centre médical car c'est une architecture hybride, lourde et encombrante : la mécanique de la structure parallèle est similaire à Prosit2 et elle ausculte de la même manière le corps du patient, mais c'est un robot sériel, de type SCARA, qui déplace la structure parallèle pour couvrir d'autres zones du corps. Prosit2 possède également un degré de liberté supplémentaire (translation) pour couvrir un plus grand espace.

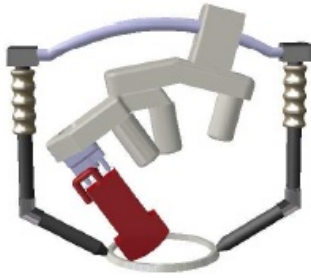


FIGURE 2 – CAO du robot Prosit1 [3]

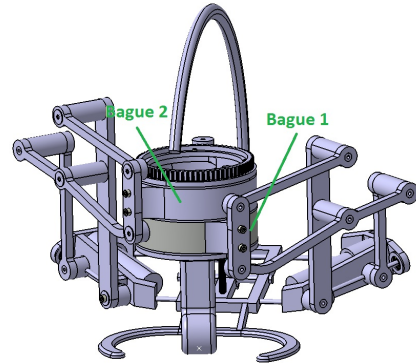


FIGURE 3 – CAO du robot Prosit2

Jusqu'à présent, aucune évaluation des performances cinématiques de ce type de robot n'a été proposée pour l'application de télé-échographie. L'objet de cet article est donc double : nous comparerons les performances générales du dernier robot sériel développé par notre laboratoire et la structure parallèle Prosit2 ; par la même occasion, nous proposerons une étude des performances cinématiques de ce robot parallèle. Une première partie sera consacrée aux choix des critères de comparaison ; nous détaillerons ensuite les modèles géométriques et cinématiques, puis nous présenterons nos résultats.

2 Choix des critères de comparaison

2.1 Performances requises

Un travail effectué en 2005 [1] propose de caractériser les mouvements de la sonde du médecin par un volume conique : l'étude indique que l'ensemble des orientations les plus fréquentes et nécessaires à l'examen d'un organe sont contenues dans un cône de demi-angle au sommet égal à 10° (Figure 4 et 5). L'inclinaison à 35° est souhaitée pour faciliter le suivi du geste médical, sachant que la limite est fixée à 75° pour éviter les collisions avec le patient. Dans tous les cas, une rotation propre de 360° est obligatoire.

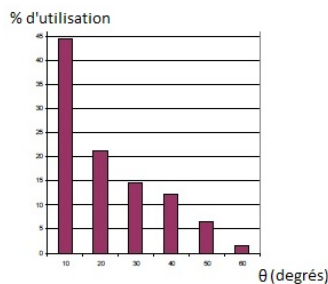


FIGURE 4 – Distribution des orientations de la sonde [2]

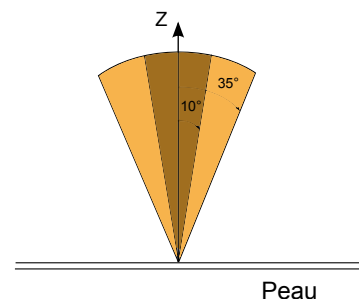


FIGURE 5 – Espace de travail souhaité et obligatoire

D'autre part, une autre étude [2] indique que le robot doit suivre une trajectoire continue : l'espace de travail doit être vide de toute singularité [1]. Enfin, pour assurer la sécurité, les parties du robot en mouvement ne doivent pas générer un risque au patient ni aux personnes qui assistent le patient [1]. De ces spécifications géométriques et cinématiques, nous en déduisons les critères de comparaison.

2.2 Critères cinématiques et encombrement

Les architectures des deux robots ont été dimensionnées pour atteindre toutes les positions de l'espace obligatoire (10°) et souhaité (35°). Les performances cinématiques et l'encombrement des deux robots ont donc été comparés dans l'espace de 35° . La continuité des trajectoires dans l'espace de travail est évaluée par observation de l'espace opérationnel. De plus, la dextérité ou le nombre de conditionnement est défini par le rapport des valeurs singulières min et max de la jacobienne J :

$$w2 = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{1}{nb \text{ de conditionnement de } J}$$

Ce critère nous donne plusieurs informations : la proximité de l'effecteur avec une position singulière, l'augmentation des couples actionneurs nécessaires pour un effort exercé sur l'effecteur et l'augmentation des vitesses actionneurs nécessaires pour une vitesse de l'effecteur.

Enfin, l'encombrement est évalué à l'aide de deux critères : la distance de sécurité et l'empiètement des pièces. Une distance de sécurité est considérée entre les parties du robot et le corps du patient. L'empiètement des pièces est évalué en comparant les écartements maximaux suivant deux directions, X et Y.

3 Modélisation géométrique et cinématique des deux robots

3.1 Détermination du modèle géométrique direct et inverse des deux robots

Pour le robot parallèle, on souhaite exprimer les paramètres opérationnels ψ , θ , ϕ (Figure 6) qui définissent l'orientation de la sonde en fonction des paramètres articulaires θ_1 , θ_2 et θ_3 . Deux moteurs commandent l'orientation des parallélogrammes, un troisième moteur commandant l'orientation propre de la sonde ; les quatrième et cinquième moteurs (translations suivant l'axe de la sonde et selon une direction perpendiculaire) ne seront pas pris en compte dans l'établissement du modèle et dans le critère cinématique pour a) éviter des problèmes d'homogénéité et b) effectuer une comparaison pertinente des deux robots.

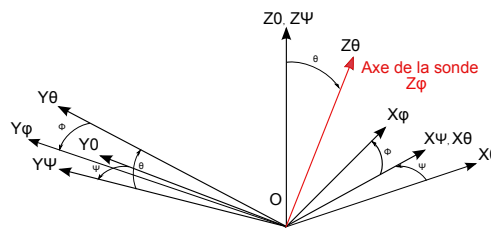


FIGURE 6 – Orientation de la sonde avec les angles d'Euler : ψ selon z_0 , θ selon x_ψ , ϕ selon z_θ

L'orientation finale de l'axe de la sonde résulte d'une composition de quatre transformations successives (Figure 7) : θ_{10} , θ_1 , $\beta_{1p} = -\beta_1 - \theta_{10}$ et θ_4 pour la première chaîne cinématique, θ_{20} , θ_2 , $\beta_{2p} = \beta_2 - \theta_{20}$ et θ_3 pour la seconde chaîne cinématique. La rotation θ_3 correspond à la rotation propre de la sonde avec l'actionneur $n^\circ 3$ par rapport à la bague de la chaîne cinématique 2. La bague de la chaîne cinématique 1 pivote d'un angle θ_{3s} par rapport à la bague de la chaîne cinématique 2, il s'agit d'une rotation interne au mécanisme ; la sonde tourne donc d'un angle $\theta_4 = \theta_3 + \theta_{3s}$ par rapport à la bague de la chaîne cinématique 1 (Figure 3).

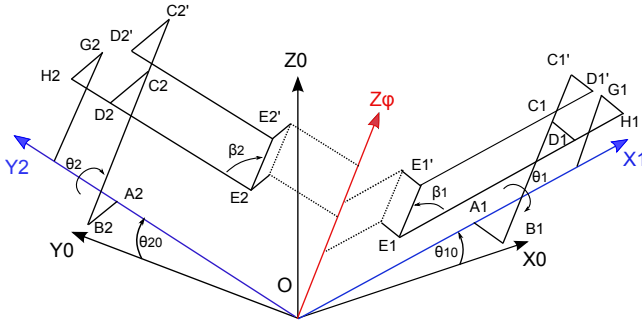


FIGURE 7 – Paramétrage de Prosit2

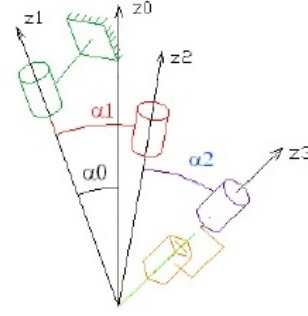


FIGURE 8 – Paramétrage de Prosit1 [2]

Pour les deux chaînes cinématiques, on obtient les compositions de rotations indiquée ci-dessous :

$$R_1 = R_{\theta_{10}} R_{\theta_1} R_{\beta_{1p}} R_{\theta_4} = R_2 = R_{\theta_{20}} R_{\theta_2} R_{\beta_{2p}} R_{\theta_3}$$

La position du vecteur Z_ϕ est issue de la composition des matrices $R_{\theta_{10}}, R_{\theta_i}$ et $R_{\beta_{ip}}$ avec Z_0 et est également obtenue comme étant l'intersection des plan P_1 avec P_2 . P_1 et P_2 sont les plans dans lesquels sont effectuées les rotations β_{1p} et β_{2p} ; ces angles passifs dépendent de θ_1 et θ_2 . On utilise la relation ci-dessous pour obtenir une composition de rotation dépendant uniquement des paramètres articulaires actifs θ_1 et θ_2 , X'_2 et Y'_1 étant deux vecteurs perpendiculaires aux plans P_1 et P_2 :

$$Z_\phi = R_{\theta_{10}} R_{\theta_1} R_{\beta_{1p}} Z_0 \text{ et } Z_\phi = X'_2 \wedge Y'_1, \quad X'_2 = R_{\theta_{20}} R_{\theta_2} X_0 \text{ et } Y'_1 = R_{\theta_{10}} R_{\theta_1} Y_0$$

On peut alors déterminer ψ, θ, ϕ en fonction de θ_1, θ_2 et θ_3 . Sachant que $R_{euler} = R_1 = R_2$, avec :

$$R_{euler} = \begin{pmatrix} \cos(\psi)\cos(\phi) - \sin(\psi)\cos(\theta)\sin(\phi) & -\cos(\psi)\sin(\phi) - \sin(\psi)\cos(\theta)\cos(\phi) & \sin(\psi)\sin(\theta) \\ \cos(\psi)\cos(\theta)\sin(\phi) + \sin(\psi)\cos(\phi) & \cos(\psi)\cos(\theta)\cos(\phi) - \sin(\psi)\sin(\phi) & -\cos(\psi)\sin(\theta) \\ \sin(\theta)\sin(\phi) & \sin(\theta)\cos(\phi) & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

On obtient pour le modèle géométrique direct :

$$\psi = \text{atan2}(R_1(1,3), -R_1(2,3)), \quad \theta = \text{acos}(R_1(3,3)), \quad \phi = \text{atan2}(R_1(3,1), R_1(3,2))$$

De la même manière on détermine le modèle géométrique inverse :

$$\theta_1 = \text{atan2}(-R_{p1}(2,3), R_{p1}(3,3)), \quad \theta_2 = \text{atan2}(R_{p2}(1,3), R_{p2}(3,3)), \quad \theta_3 = \text{atan2}(R_{p2}(2,1), R_{p2}(2,2))$$

Avec

$$R_{p1} = R'_{\theta_{10}} R_{euler} = R'_{\theta_{10}} R_1 = \begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -\sin(\theta_1)\cos(\beta_{1p}) \\ \dots & \dots & \cos(\theta_1)\cos(\beta_{1p}) \end{pmatrix}$$

$$R_{p2} = R'_{\theta_{20}} R_{euler} = R'_{\theta_{20}} R_2 = \begin{pmatrix} \dots & \dots & \sin(\theta_2)\cos(\beta_{2p}) \\ \cos(\beta_{2p})\sin(\theta_3) & \cos(\beta_{2p})\cos(\theta_3) & \dots \\ \dots & \dots & \cos(\theta_2)\cos(\beta_{2p}) \end{pmatrix}$$

Pour le robot sériel, le modèle géométrique direct est donné ci dessous. Avec la même méthode, on peut en déduire ψ, θ, ϕ en fonction de $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ et vice-versa. L'angle α_i définit l'orientation des axes de la pivot i avec la pivot $i + 1$. On a $\alpha_0 = 10^\circ, \alpha_1 = \alpha_2 = 23^\circ$ (Figure 8).

$$R_{euler} = R_{serie} = {}^0R_1 {}^1R_2 {}^2R_3, \text{ avec } {}^{i-1}R_i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 \\ \cos(\alpha_i)\sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i)\cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \\ \sin(\alpha_i)\sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{pmatrix}$$

3.2 Détermination des deux matrices jacobiennes

Le modèle cinématique nous permet d'établir une relation entre les vitesses articulaires et les vitesses opérationnelles :

$$\dot{X} = [\Omega_x \ \Omega_y \ \Omega_z]^T = J_\omega [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T = J_\omega \dot{q}$$

Par composition des vitesses de rotations pour les deux chaînes cinématiques, on obtient :

$$\vec{\Omega} = \Omega_x \vec{X} + \Omega_y \vec{Y} + \Omega_z \vec{Z} = \dot{\theta}_4 \vec{Z}_\phi + \dot{\theta}_3 \vec{Z}_\phi + \dot{\beta}_1 p \vec{Y}'_1 + \dot{\theta}_1 \vec{X}_1 = \dot{\theta}_3 \vec{Z}_\phi + \dot{\beta}_2 p \vec{X}'_2 + \dot{\theta}_2 \vec{Y}_2$$

On obtient les équations suivantes, après projection :

$$\vec{\Omega} \cdot \vec{Y}_2 = \dot{\theta}_3 \vec{Z}_\phi \cdot \vec{Y}_2 + \dot{\theta}_2, \quad \vec{\Omega} \cdot \vec{Z}'_2 = (\dot{\theta}_2 \vec{Y}_2 + \dot{\theta}_3 \vec{Z}_\phi) \cdot \vec{Z}'_2, \quad \vec{\Omega} \cdot \vec{X}_\phi = \dot{\theta}_1 \vec{X}_1 \cdot \vec{X}_\phi$$

On a alors $J_\omega \text{ parallele} = -(A^{-1}) B$, tel que $A\dot{X} + B\dot{q} = 0$ avec :

$$A = \begin{pmatrix} \vec{X}_\phi^T \\ \vec{Y}_2^T \\ \vec{Z}'_2^T \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad B = - \begin{pmatrix} \vec{X}_\phi \cdot \vec{X}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \vec{Y}_2 \cdot \vec{Y}_2 & \vec{Y}_2 \cdot \vec{Z}_\phi \\ 0 & \vec{Z}'_2 \cdot \vec{Y}_2 & \vec{Z}'_2 \cdot \vec{Z}_\phi \end{pmatrix}$$

Pour le robot sériel, la jacobienne est indiquée ci dessous ($cx = \cos(x)$, $sx = \sin(x)$) :

$$J_\omega \text{ serie} = \begin{pmatrix} 0 & s\alpha_1 s\theta_1 & c\theta_1 s\alpha_2 s\theta_2 - s\theta_1 (-c\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_2 - s\alpha_1 c\alpha_2) \\ -s\alpha_0 & -c\alpha_0 s\alpha_1 c\theta_1 - s\alpha_0 c\alpha_1 & J_\omega \text{ serie } 23 \\ c\alpha_0 & c\alpha_0 c\alpha_1 - s\alpha_0 s\alpha_1 c\theta_1 & J_\omega \text{ serie } 33 \end{pmatrix}$$

$$J_\omega \text{ serie } 23 = c\alpha_0 s\theta_1 s\alpha_2 s\theta_2 - s\alpha_0 (c\alpha_1 c\alpha_2 - s\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_2) + c\alpha_0 c\theta_1 (-c\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_2 - s\alpha_1 c\alpha_2)$$

$$J_\omega \text{ serie } 33 = s\alpha_0 s\theta_1 s\alpha_2 s\theta_2 + c\alpha_0 (c\alpha_1 c\alpha_2 - s\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_2) + s\alpha_0 c\theta_1 (-c\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_2 - s\alpha_1 c\alpha_2)$$

4 Comparaison

Le déterminant calculé pour toutes les postures dans l'espace de travail de 35° est nul pour le robot sériel quand $\theta = 10^\circ$ et $\psi = 0^\circ$ ou 360° : la position singulière est atteinte quand les axes des liaisons pivots sont alignés. Pour le robot parallèle, il n'y a aucune singularité dans l'espace considéré. La dextérité des deux robots sur l'espace de travail est représentée figures 9 et 10. On se rend compte de la présence de ces deux singularités et globalement d'une moins bonne valeur pour le robot sériel.

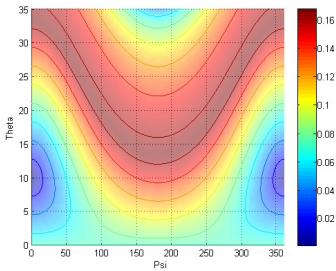


FIGURE 9 – Dextérité pour le robot sériel (max $\approx 0,2$)

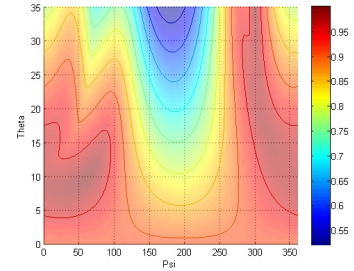


FIGURE 10 – Dextérité pour le robot parallèle (max ≈ 1)

Le dernier critère de comparaison concerne l'encombrement ; l'évaluation de ce critère est important pour l'application visée, car le robot ne doit gêner ni le patient, ni la praticien lors de l'opération. A notre connaissance, peu de travaux portent sur la quantification de l'encombrement d'un robot ; il est néanmoins fait mention d'un espace de travail passif, c'est à dire d'un volume balayé par des chaînes

cinématiques passives pour un robot parallèle dans [5]. Ici, nous avons représenté les surfaces balayées par des points appartenant aux corps de chaque chaîne cinématique passive du robot. Les surfaces en noir correspondent aux balayage des points D_i , H_i , G_i , C_i , C_i' , D_i' , E_i' et F_i' pour le robot parallèle (Figure 11). Les surfaces en marron correspondent à des points appartenant aux corps du robot sériel, situés sur les axes de chaque liaison pivot.

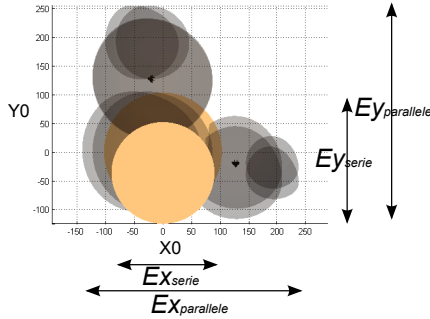


FIGURE 11 – Empiètement des deux robots

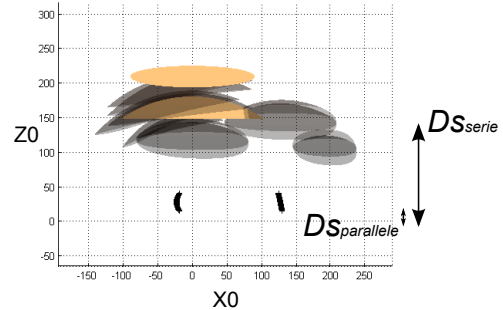


FIGURE 12 – Distance de sécurité

Nous définissons l'empiètement selon X (resp. selon Y) comme étant la projection des surfaces apparentes balayées par les deux robots selon la direction X_0 (resp. Y_0). On en déduit l'empiètement relatif, ou le rapport des empiètements selon X et Y pour chaque robot : ξ_x et ξ_y : $\xi_x = \frac{Ex_{parallele}}{Ex_{serie}} = 2$ et $\xi_y = \frac{Ey_{parallele}}{Ey_{serie}} = 2$. On obtient également les distances de sécurité $Ds_{parallele}$ et Ds_{serie} à partir du balayage des points B_i pour le robot parallèle (Figure 12) : $Ds_{parallele} = 14 \text{ mm}$, $Ds_{serie} = 150 \text{ mm}$

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté et comparé les performances de deux robots conçus pour la télé-échographie. Les exigences de l'application concernent la continuité des trajectoires dans un cône de 35° , l'éloignement de l'effecteur aux singularités, la capacité de l'effecteur à se déplacer dans les meilleures conditions, ainsi que la limitation de l'encombrement.

Il s'avère que la distance de sécurité du robot sériel est plus importante que celle du robot parallèle. Il apparaît également que l'empiètement est deux fois plus important pour la structure parallèle. Néanmoins, les performances cinématiques du robot parallèle sont meilleures que celles du robot sériel. D'un point cinématique, l'architecture parallèle répond mieux aux contraintes de l'applications que l'architecture sérielle. Il se pose donc la question de l'appréciation de l'encombrement et de la distance de sécurité du point de vue du médecin et du patient. La conception du robot parallèle est encore au stade préliminaire (approche essai/erreur), nos prochains travaux porteront donc sur la conception optimale du mécanisme pour dimensionner rigoureusement les corps en fonction de contraintes d'encombrement. Nous travaillerons également sur l'optimisation de forme des corps pour alléger la structure.

Références

- [1] L. Al bassit. *Structures mécaniques à modules sphériques optimisées pour un robot médical de télé-échographie mobile*. PhD thesis, Université d'Orléans, 2005.
- [2] L. Nouaille. *Démarche de conception de robots médicaux-Application à un robot de télé-échographie*. PhD thesis, Université d'Orléans, 2009.
- [3] L.Nouaille N.Smith-Guérin G.Poisson & P.Arbeille. Optimization of a 4 dof tele-echography robot. In *The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010.
- [4] F.Najafi & N. Sepehri. A robotic wrist for remote ultrasound imaging. *Mechanism and Machine Theory*, 2011.
- [5] L. Romdhane Z. Affi and A. Maalej. Dimensional synthesis of a 3-translational-dof in-parallel manipulator for a desired workspace. *European Journal of Mechanics*, Volume 23, Issue 2 :Pages 311–324, 2004.