

Comparaison de la répétabilité des robots manipulateurs séries et parallèles à l'aide des ellipsoïdes stochastiques

R-M. ASSOUMOU NZUE, J-F. BRETHER, E. VASSELIN, D.LEFEBVRE

Groupe de Recherche en Electrotechnique et Automatique du Havre, 25 rue du Philippe Lebon 76600
LE HAVRE

Résumé :

Les robots parallèles sont-ils plus précis que les robots séries ? Dans cet article, les auteurs donnent des éléments de réponse en ce qui concerne la répétabilité. La répartition spatiale des écarts de position est prise en compte grâce à la modélisation de la répétabilité par la méthode des ellipsoïdes stochastiques développée au GREAH. Pour que la comparaison soit équitable, les auteurs choisissent le même type d'actionneur (linéaire ou rotatif), la même matrice de covariance et le même espace de travail et étudient plusieurs critères de comparaison.

Abstract :

Are parallel robots more accurate than serial robots? In this paper, the authors give some answers concerning repeatability. The spatial distribution of position deviation is taken into account via the stochastic ellipsoid modeling developed in the GREAH. For a fair comparison, the authors choose the same actuators (prismatic or rotational), the same covariance matrix and the same workspace then study the comparison criteria.

Mots clefs: précision, répétabilité, ellipsoïdes stochastiques, Robots manipulateurs

I. Introduction

L'utilisation de robots manipulateurs dans des tâches d'insertion et de manipulation de plus en plus fines nous incite à améliorer notre connaissance sur leur précision et leur comportement à l'échelle micrométrique. L'acheteur d'un robot manipulateur industriel doit choisir son produit dans une large gamme d'un secteur concurrentiel. Il connaît les tâches qu'il désire confier au robot et doit donc disposer, pour chaque robot proposé sur le marché, de critères de performances fiables.

Il existe différents critères de performances capables de caractériser la précision d'un robot manipulateur. Les plus connus sont l'exactitude et la répétabilité en pose et en orientation. Les normes ISO9283 et ANSI R15 [1,2] donnent les procédures et les définitions détaillées des principaux critères. Les performances des robots sont influencées par la vitesse, la charge ou la localisation de la tâche dans l'espace de travail [3,4].

L'architecture cinématique du robot joue aussi un rôle majeur concernant les performances en précision. A ce sujet, il est généralement admis que les robots parallèles sont intrinsèquement plus précis que les robots sériels [5] sans que cela repose sur un fondement scientifique.

Dans cet article nous souhaitons participer à ce débat en analysant en particulier les performances en répétabilité. Différents critères seront utilisés, notamment la répétabilité classique au sens ISO 9283, puis des critères de performance nouveaux résultant de la modélisation de la répétabilité par la théorie des ellipsoïdes stochastiques [6]. Nous comparons la répétabilité d'une paire de robots série et parallèle ayant des actionneurs prismatiques ou rotoïdes identiques. Les résultats de l'analyse nuancent l'opinion couramment admise et dépendent fortement de l'espace de travail considéré.

II. METHODOLOGIE DE COMPARAISON DE LA REPETABILITE

Pour comparer les deux types d'architecture, nous allons suivre la procédure suivante :

1- Choisir une paire de robots série/parallèle avec des actionneurs prismatiques ou rotoïdes identiques. On considère alors que les erreurs sur ces actionneurs sont distribuées statistiquement de la même manière.

2- Utiliser la théorie des ellipsoïdes stochastiques pour modéliser le phénomène de répétabilité.

3-Définir des critères de comparaison classiques et plus innovants issus de la théorie des ellipsoïdes stochastiques. Ces critères doivent pouvoir aussi ultérieurement être mesurés et estimés physiquement.

II.1 Choix des robots

Nous étudions deux paires de robots plans à 2 degrés de liberté, à actionneurs rotoïdes le RRRRR (fig. 1) et le SCARA (fig. 2) puis à actionneurs prismatiques le PRRRP (fig. 3) et le cartésien (fig. 4) afin de compléter les études menées par S. Briot et Ilian A. Bonev [5].

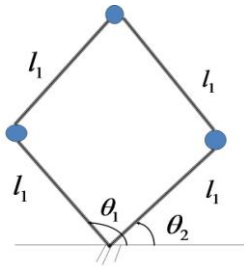


FIG.1– Robot parallèle RRRRR

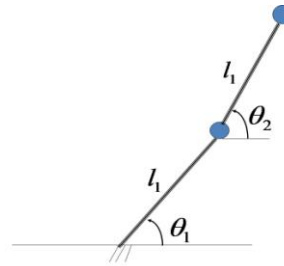


FIG.2– Robot SCARA

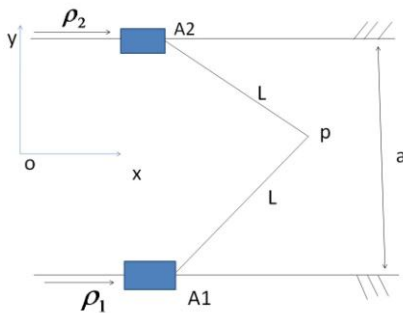


FIG.3– Robot parallèle PRRRP

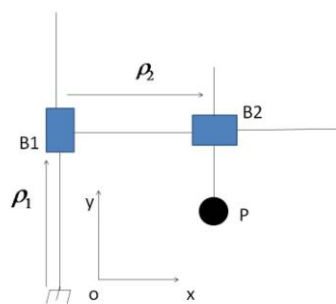


FIG.4– Robot cartésien

Ces robots ont des architectures très simples. La première paire à actionneurs rotoïdes a déjà été soumise à une étude similaire lors de nos précédents travaux [7]. Nous allons donc développer dans cet article l'analyse concernant la paire à actionneurs prismatiques constituée du robot parallèle PRRRP et du robot série cartésien.

II.2 Théorie des ellipsoïdes stochastiques

Depuis l'introduction des ellipsoïdes de manipulabilité par Yoshikawa, de nombreux travaux ont été publiés autour de ce concept, notamment les ellipsoïdes de vitesse et d'effort obtenus en considérant la transformation mécanique du système vitesse/couple articulaire dans l'espace opérationnel [8]. Cette approche cinématique est intéressante pour repérer des points singuliers ou pour choisir les axes les plus adaptés pour commander le robot en vitesse. Cependant elle souffre de limitations. Tout d'abord, elle ne tient pas suffisamment compte des caractéristiques de performance intrinsèques à chaque articulation. Puis, elle n'est pas applicable à un robot ayant plusieurs types d'actionneurs rotoïde/prismatique en raison de l'hétérogénéité des grandeurs physiques qui interviennent. En ce qui concerne la modélisation de la répétabilité, nous utiliserons le concept d'ellipsoïdes stochastiques déjà appliqué avec succès au robot SCARA [9].

La répétabilité peut être modélisée par la théorie des ellipsoïdes stochastiques [6] qui s'applique aussi bien aux robots série qu'aux robots parallèles.

Dans le cas d'un robot série, la commande du robot nécessite la connaissance de son modèle géométrique direct, liant coordonnées articulaires X et articulaires θ : $X = F(\theta)$

La différentiation du modèle géométrique direct fait apparaître la matrice jacobienne J : $dX = J(\theta)d\theta$

Dans le cas d'un robot parallèle, la matrice jacobienne s'obtient à partir des équations de fermeture de boucle : $f(p, q) = 0$

Qui différenciées font apparaître les 2 matrices A et B appelées respectivement matrices jacobienne parallèle et sérielle [10] : $B\dot{q} + A\dot{p} = 0$

La matrice jacobienne cinématique J du robot parallèle est donc définie par : $J = A^{-1} \times B$

Dans les deux cas, robot série ou parallèle, les variations des variables cartésiennes sont reliées aux variations des variables articulaires par la matrice jacobienne.

De plus, on a les deux hypothèses suivantes issues de mesures expérimentales [6] :

1- Chaque variable articulaire correspondant à un degré de mobilité, est une variable aléatoire gaussienne.

2- Les variables aléatoires articulaires sont des variables aléatoires indépendantes.

Les variables aléatoires articulaires sont alors des vecteurs gaussiens dont la matrice de covariance D est diagonale : $D = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2)$

Par conséquent, la distribution des positions cartésiennes est encore un vecteur aléatoire gaussien de matrice de covariance $C = JDJ^T$

La densité de probabilité des positions cartésiennes est donnée par : $g(dX) = k \exp\left(\frac{1}{2} dX^T C^{-1} dX\right)$

Les surfaces iso-densité du robot sont des ellipsoïdes d'équation : $dX^T C^{-1} dX = Cte$

On définit un ellipsoïde stochastique de référence d'équation : $dX^T C^{-1} dX = 1$

Les longueurs des demi-axes de l'ellipsoïde de référence sont les racines carrées des valeurs propres de la matrice de covariance C et les directions des axes principaux des ellipsoïdes stochastiques sont les vecteurs propres de la matrice de covariance C.

Tous les ellipsoïdes peuvent s'obtenir à partir de l'ellipsoïde de référence par une homothétie centrale de rapport k lié au risque α . Le risque est la probabilité que le point se retrouve hors de l'ellipsoïde.

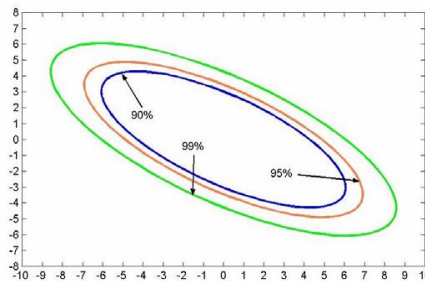


FIG.5– Ellipses contenant 90%, 95% et 99% des valeurs

II.3 Les critères de performances

L'étude comparative portera sur les critères suivants :

1. La répétabilité au sens ISO 9283 : $R_p = \bar{L} + 3\sigma_L$ où L est la distance entre

les points atteints et le barycentre du nuage de points. Cette répétabilité peut se calculer directement connaissant la distribution spatiale de la VA position.

2. La surface de l'ellipsoïde.
3. Le critère maximax (fig. 6) qui correspond à la longueur du grand demi-axe de l'ellipse et indique en quelque sorte l'erreur maximale dans une direction donnée.

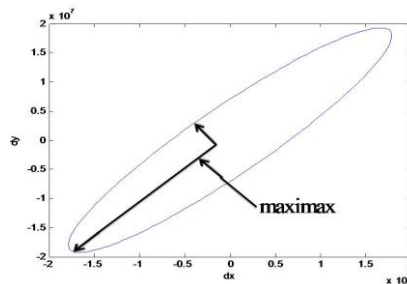


FIG. 6– erreur maximax

III. RESULTATS DE COMPARAISON

Nous allons visualiser l'évolution des critères de performance répétabilité, surface et Maximax respectivement (fig. 5), (fig. 6) et (fig. 7) en fonction des paramètres géométriques L, longueur des bras du robot PRRRP et a distance entre les 2 rails du robot PRRRP. Nous fixons $a=4\text{dm}$ et $L=3, \dots, 8$ en dm. Mais on pourrait sans dénaturer les conclusions prendre d'autres dimensions.

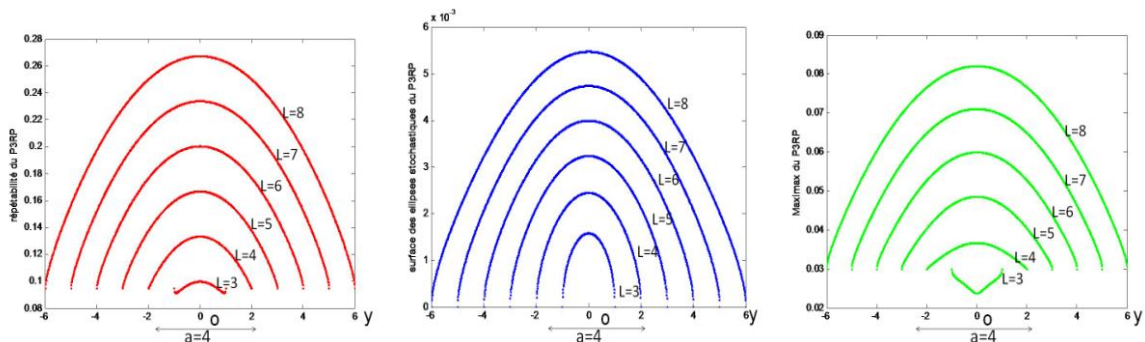


FIG. 7– évolution de la répétabilité FIG. 8– évolution de la Surface FIG. 9– évolution du Maximax

Les courbes nous montrent que tous les critères suivent la même tendance en fonction du paramètre L. Plus ce paramètre croît, moins le robot est performant. Cela nous permet de compléter les travaux de [11] quant au dimensionnement optimal des paramètres géométriques du PRRRP. Il est plus approprié de choisir L le plus petit possible en tenant bien compte de la condition sur l'espace de travail $a/2 < L$. Nous avons également une symétrie des performances dans l'espace de travail. Ce résultat nous permettra d'étudier les performances du robot PRRRP sur une portion de droite de l'espace de travail, le reste se déduisant par des translations des moteurs linéaires. Le robot série cartésien sera étudié dans cette région, puisqu'il a l'avantage d'avoir les mêmes performances quelque soit le point où l'on souhaite réaliser la tâche dans son espace de travail.

Nous allons maintenant visualiser les ellipses de répétabilité du robot PRRRP et cartésien pour comparer leurs orientations et leur excentricité en un même point de l'espace de travail. Comme cela a été dit précédemment l'étude se fera sur une portion de droite [Oy) comprise entre l'origine O du repère du PRRRP et la position extrême atteinte par son effecteur. Cette représentation en fig.10 correspond au cas particulier où $a=4\text{dm}$ et $L=8\text{dm}$ et le risque vaut $\alpha=0,05$.

D'une manière générale, pour le robot cartésien on retrouve évidemment des cercles car le comportement est isotrope. Pour le robot parallèle, au contraire, la taille et l'orientation des ellipses évoluent considérablement

du centre de l'espace de travail vers sa périphérie.

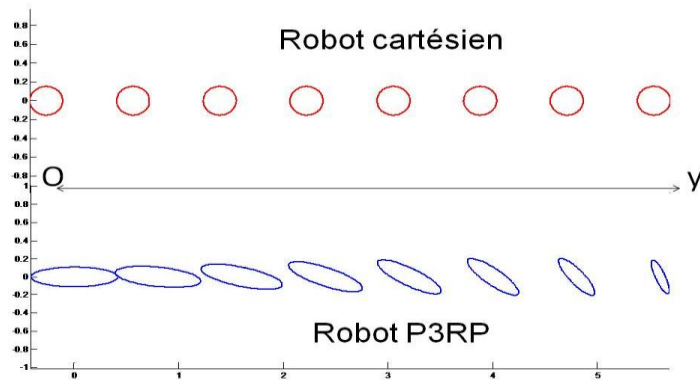


FIG. 10– ellipses stochastiques du PRRRP et du Cartésien pour L=8

Nous allons maintenant étudier et comparer plus précisément trois critères : répétabilité, surface des ellipses et maximax respectivement (fig. 10), (fig. 11) et (fig. 12) pour les 2 robots dans l'espace de travail.

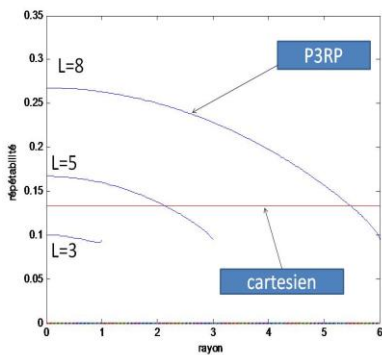


FIG. 11–Répétabilité

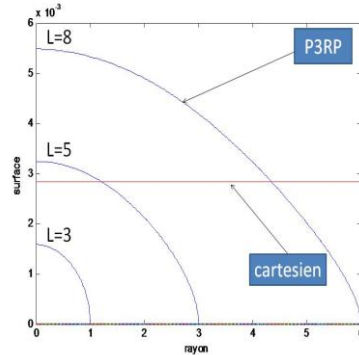


FIG. 12–Surface

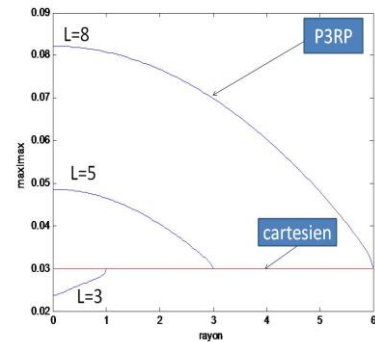


FIG. 13–Maximax

Ces courbes nous permettent de réaliser les observations suivantes :

- La répétabilité du robot PRRRP est meilleure dans tout l'espace de travail lorsque nous sommes dans la condition géométrique L=3. Lorsque L augmente, par exemple L=5, alors le robot cartésien est meilleur sur les 70% de l'espace de travail proche du centre, alors que le PRRRP est meilleur à la périphérie. Nous observons la même tendance pour L=8 avec 91% en faveur du cartésien.

- Si on considère la surface des ellipses du robot PRRRP, les courbes montrent que ce robot est meilleur que le robot cartésien dans tout l'espace de travail pour ce critère lorsque L=3. Si L=5, alors le robot cartésien est meilleur sur 41% de l'espace de travail proche du centre, alors que le PRRRP est meilleur à la périphérie. Nous observons la même tendance pour L=8 avec 72% en faveur du cartésien.

- Le maximax des ellipses du robot P3RP montre comme précédemment que ce robot est meilleur dans tout l'espace de travail pour ce critère lorsque L=3 sauf au niveau de la singularité en périphérie de l'espace de travail où les 2 robots ont les mêmes performances. Pour L=5 ou L=8, le cartésien est meilleur sur tout l'espace de travail, les performances des deux robots restant identiques sur la singularité. Dans le cas du critère maximax, il est intéressant de noter que la comparaison a un résultat en tout ou rien. Lorsqu'un robot est meilleur que l'autre, c'est sur toute la surface de travail.

L'analyse fait apparaître un résultat très intéressant : lorsque la dimension L du bras du P3RP passe en dessous d'un certain seuil proche de 3,5, le robot parallèle sera meilleur que le robot série sur tout

l'espace de travail en ce qui concerne la répétabilité au sens ISO.

Lorsque le bras a une longueur L supérieure à 3,5, alors le résultat diffère suivant la localisation dans l'espace de travail. Le pourcentage de l'espace de travail pour lequel le robot cartésien a de meilleures performances a tendance à augmenter en fonction de l'accroissement de L . D'une manière générale, pour de petites longueurs de L , l'avantage de la répétabilité revient au robot parallèle. Mais cela se fait au détriment de la surface de travail. Si on augmente la surface de travail, alors le robot cartésien reprend l'avantage et a tendance à s'imposer lorsque L voisine 8 dm.

IV. Conclusions

Notre méthodologie de comparaison repose sur l'utilisation du même type d'actionneurs et de la même matrice de covariance pour les deux robots. Cependant en raison des différences notables au niveau des espaces de travail, ce paramètre finit par se révéler important. Nous avons alors montré la nécessité d'optimiser une architecture parallèle, en fonction des critères de performance choisis, avant de la comparer à une architecture série. En effet, les performances du PRRRP sont totalement différentes suivant les valeurs de L choisies. Cela nous a permis de compléter l'étude de [11] quant à l'optimisation en répétabilité d'un robot PRRRP. Ce processus d'optimisation, d'une part rend très performant le robot parallèle mais d'autre part réduit considérablement son espace de travail, alors que le robot série classique ne connaît pas cette limitation.

Les résultats de comparaison obtenus dépendent fortement de la longueur du bras du robot P3RP. Si le bras a une longueur limitée, le robot parallèle est plus répétable que le robot série sur tout l'espace de travail. Si le bras a une longueur plus importante, le pourcentage de l'espace de travail où le robot parallèle est plus répétable a tendance à se réduire et petit à petit, le robot cartésien s'impose. Les résultats de la comparaison dépendent aussi du critère choisi. Alors que dans nos exemples, le critère maximax donne des réponses catégoriques, les autres critères donnent des avantages sur des zones de l'espace de travail particulières. Dans une précédente étude réalisée entre le RRRRR et le SCARA [7], nous avons observé des phénomènes similaires. La réponse à la question « les robots parallèles sont-ils plus répétables que les robots séries ? » ne peut donc être que fortement nuancée suivant le contexte.

Références

- [1] NF EN ISO 9283, "Performance criteria and Related Test Methods for industrial manipulators", Août 1998
- [2] Institute, A. N. S.I, American National Standard for Industrial Robots and Robot Systems - Point-to-Point and Static Performance characteristics -Evaluation, R15.05-1-1990.
- [3] O. Felix Offodile et Kingsley Ugwu. "Evaluating the effect of speed and payload on robot repeatability". *Robotics and computer-Integrated Manufacturing*, 8(1) :27—33, 1991.
- [4] Raziél Riemer et Yael Edan. "Evaluation of influence of target location on robot repeatability" *Robotica*, 18 :443-449, 2000.
- [5] Briot, S., et Bonev, I.A., "Are Parallel Robots More Accurate Than Serial Robots", *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 31, No. 4, pages 445–455, 2007
- [6] Jean-François Brethé, Eric Vasselín, Dimitri Lefebvre and Brayima Dakyo "Modelling of repeatability phenomena using the stochastic ellipsoid approach", *Robotica*, Volume 24, Issue 04, Jul 2006, pp 477-490
- [7] R.-M Assoumou Nzue., Brethé, J.F., Vasselín, E., Lefebvre D. "Comparative analysis of the repeatability performance of a serial and parallel robot", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, Taipei, 18-22 Oct. 2010
- [8] F. Caccavale and M. Uchiyama. "Springer Handbook of Robotics", Springer, Chap. 29, page 710, 2008
- [9] Jean-François Brethé, "Optimising SCARA design for better repeatability", *International Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 3, Iss. 2, p. 021010..
- [10] Merlet Jean-Pierre. "Les robots parallèles".-2eme éd.-Paris : Hermès, 1997
- [11] X.-J. Liu, J. Wang, and G. Pritschow, "On the optimal kinematic design of the PRRRP 2-DOF parallel mechanism," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 41, No. 9, pp. 1111–1130, 2006.