

Étalonnage géométrique du robot RV-2AJ

Abdelmadjid FLITTI* et Houria SEGAI

Laboratoire de Modélisation Numérique et Expérimentale des Phénomènes Mécaniques
 Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et de la Technologie
 Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 27000 Mostaganem, Algérie
 *auteur correspondant : flitti.madjid@gmail.com

Résumé - En programmation hors ligne, la plupart des erreurs de positionnement de l'outil du robot sont, étroitement, liées à la différence existant entre les paramètres géométriques nominaux (théoriques) et les paramètres réels. Ainsi, le recours à l'étalonnage géométrique des robots est incontournable pour augmenter leurs précisions absolues. Ce travail s'inscrit dans ce contexte, et vise à identifier les paramètres géométriques réels du robot RV-2AJ.

Dans le cadre de cette étude, nous présentons d'abord le modèle d'étalonnage du robot RV-2AJ. Ce modèle à 17 paramètres est basé sur le calcul de l'écart entre les positions désirées et réelles. Ensuite, nous testons l'efficacité et la convergence de ce modèle en prenant 56 configurations de mesures. Les résultats obtenus sont très satisfaisants, en effet, la précision dans les 56 points est devenue inférieure à 10^{-15} m après 100 itérations.

Finalement, nous avons vérifié la validité de l'étalonnage sur la précision du robot dans l'ensemble de son volume de travail, en choisissant, arbitrairement, 3600 configurations dans la plan $z=215$ mm. Cette vérification a prouvé l'amélioration significative de la précision qui est devenue de l'ordre de 0.004mm.

Mots Clés : Etalonnage géométrique, robot RV-2AJ, paramètres nominaux, paramètres réels, jacobienne généralisée.

Nomenclature

d_{j-1}	Longueur de la normale commune aux axes des liaisons O_j et O_{j-1}	ΔP	Vecteur de l'écart global entre les situations réelles et les situations désirées
r_j	Distance le long de z_j du support de x_j au support de x_{j-1}	ΔX_p	Vecteur d'écart entre la situation de l'organe terminal réelle et la situation désirée
W	Matrice Jacobienne globale du modèle d'identification	$\Delta \xi$	Vecteur des erreurs sur les paramètres géométriques
W^+	Pseudo-inverse de la matrice Jacobienne globale	ξ_n	Vecteur des paramètres géométriques nominaux
X_p	Vecteur position de l'organe terminal dans le repère R_0	ξ_r	Vecteur des paramètres géométriques réels
α_{j-1}	Angle entre l'axe z_j et z_{j-1} mesuré autour de x_{j-1}	θ_j	Angle entre l'axe x_j et x_{j-1} mesuré autour de z_j
β_j	Angle de rotation autour de y_{j-1} et qui permet de caractériser un défaut de parallélisme des axes z_{j-1} et z_j	Ψ	Matrice Jacobienne généralisée

1. Introduction

L'augmentation de la précision absolue des robots passe par la minimisation, voir l'élimination, des effets des erreurs de positionnement de l'organe terminal [1]. Ces erreurs peuvent être dues soit à des facteurs géométriques (paramètres du modèle géométrique,

définition de l'organe terminal, offset des axes,...) soit à des facteurs non pris en compte dans les modèles (souplesse des articulations et des bras, défauts de transmission dans les systèmes, jeu mécanique, effet thermique,...) [2]. Cependant plusieurs auteurs ont évoqué que, pour les robots sériels, 95% des erreurs sont dues à des facteurs géométriques [3-5]. Ainsi, l'augmentation de la précision passe par l'identification des paramètres géométriques réels du robot, cette opération s'appelle l'étalonnage géométrique.

L'étalonnage géométrique consiste à déterminer, suite à une série de mesures, les valeurs numériques des paramètres géométriques des robots [6] qui minimisent le plus les erreurs de positionnement [3]. Notre travail s'inscrit dans cette problématique et vise à élaborer un modèle d'étalonnage du robot RV-2AJ afin d'identifier ces paramètres géométriques réels.

2. Modèle d'étalonnage

L'identification des paramètres géométriques exacts du robot à cinq degrés de liberté RV-2AJ est basée sur la minimisation de l'écart entre la situation de l'organe terminal désirée et la situation réelle. Dans ce travail, on suppose que le référentiel de la cellule est confondu avec celui de la base. D'autre part, du faite de l'absence des données géométriques de la pince FESTO fixée sur l'organe terminal, on se limite à l'identification des paramètres géométriques intrinsèques au robot c'est-à-dire les paramètres liants la base du robot à son organe terminal.

2.1. Modèle géométrique complet du robot RV-2AJ

Le passage d'un repère R_j vers un repère R_{j-1} se fait à l'aide d'une matrice de transformation élémentaire (${}^{j-1}T_j$) de Denavit- Hartenberg modifiée par Khalil [3,7], dont l'expression est comme suit :

$${}^{j-1}T_j = Rot(x, \alpha_j) Trans(x, d_j) Rot(z, \theta_j) Trans(z, r_j) = \begin{bmatrix} c_{\theta_j} & -s_{\theta_j} & 0 & d_j \\ c_{\alpha_j}s_{\theta_j} & c_{\alpha_j}c_{\theta_j} & -s_{\alpha_j} & -r_j s_{\alpha_j} \\ s_{\alpha_j}s_{\theta_j} & s_{\alpha_j}c_{\theta_j} & c_{\alpha_j} & r_j c_{\alpha_j} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$



Figure 1 : Robot RV-2AJ.

Pour l'étalonnage, un cinquième paramètre β_j , qui caractérise un défaut de parallélisme des axes z_{j-1} et z_j par rapport à y_{j-1} , est ajouté [3, 5, 8] :

$$Rot(y, \beta_j) = \begin{bmatrix} C_{\beta_j} & 0 & S_{\beta_j} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_{\beta_j} & 0 & C_{\beta_j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Alors, la relation (1) devient :

$${}^{j-1}T_j^C = Rot(y, \beta_j) Rot(x, \alpha_j) Trans(x, d_j) Rot(z, \theta_j) Trans(z, r_j) \quad (3)$$

Ainsi, le modèle géométrique complet (c'est-à-dire le modèle qui fait intervenir tous les paramètres géométriques) a l'expression suivante :

$${}^0T_5^C = {}^0T_1^C * {}^1T_2^C * {}^2T_3^C * {}^3T_4^C * {}^4T_5^C \quad (4)$$

Ce modèle est fonction de 25 paramètres géométriques :

$${}^0T_5^C = \begin{bmatrix} {}^0R_5^C & \begin{matrix} {}^0p_x^C \\ {}^0p_y^C \\ {}^0p_z^C \end{matrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = f(\beta_1, \dots, \beta_5, \alpha_1, \dots, \alpha_5, d_1, \dots, d_5, \theta_1, \dots, \theta_5, r_1, \dots, r_5) \quad (5)$$

Où :

- ${}^0R_5^C$: matrice d'orientation du repère R_5 par rapport au repère R_0 ,
- $X_p = \begin{Bmatrix} p_x^C \\ p_y^C \\ p_z^C \end{Bmatrix}$: vecteur position de l'organe terminal par rapport au repère R_0 .

2.2. Modèle différentiel généralisé du robot RV-2AJ

Le modèle différentielle généralisé permet de calculer la variation de la position de l'organe terminal, en fonction des variations des paramètres géométriques [6]. Dans notre travail seule la position de l'organe terminal est mesurée. Ainsi, le modèle d'étalonnage s'exprime par la relation différentielle suivante :

$$\Delta X_p = \begin{bmatrix} \Delta p_x^C \\ \Delta p_y^C \\ \Delta p_z^C \end{bmatrix} = \Psi \cdot \Delta \xi \quad (6)$$

avec :

- ✓ ΔX_p : Le vecteur d'écart, de dimension (3×1), entre la situation de l'organe terminal réelle et la situation désirée.
- ✓ $\Delta \xi$: est le vecteur de la variation des paramètres géométriques (de dimension 25×1) égal à la différence entre les paramètres géométriques réels ξ_r et les paramètres nominaux ξ_n (c'est-à-dire correspondant à la géométrie du robot fournie par le constructeur, ainsi $\Delta \xi = \xi_r - \xi_n$).
- ✓ Ψ : est la matrice Jacobienne généralisée (ou matrice jacobienne des paramètres géométriques).

Malheureusement, ce n'est pas tous les paramètres qui sont identifiables [3]. En effet, la détermination des paramètres géométriques identifiables est basée sur la détermination des colonnes indépendantes de la matrice Jacobienne d'étalonnage Ψ . Le criblage des paramètres identifiables, pour la méthode d'étalonnage choisie [3], passe par les étapes suivantes:

- ✓ Le paramètre β_j n'est pas identifiable lorsque $\alpha_j \neq 0$: ainsi pour le robot RV-2AJ, β_2 et β_5 ne sont pas identifiables.
- ✓ Si une colonne de Ψ est égale à zéro, le paramètre correspondant est sans effet sur le modèle d'étalonnage géométrique : l'examen des colonnes de la matrice Ψ a montré que les colonnes $\Psi\alpha_4$, $\Psi\alpha_5$, $\Psi\theta_4$ et $\Psi\theta_5$ sont nulles, par conséquent α_4 , α_5 , θ_4 et θ_5 ne sont pas identifiables.
- ✓ Si l'articulation d'axes $i-1$ et i sont parallèles, les colonnes correspondant aux paramètres r_{i-1} et r_i sont égales ($\Psi r_{i-1} = \Psi r_i$). Dans ce cas, la solution de base consiste à l'identification de l'erreur dans l'un de ces paramètres tout en supposant que l'erreur de l'autre paramètre est nulle, suite à cette exigence r_3 et r_4 ne sont pas identifiables.

Ainsi huit paramètres ne sont pas identifiables dont quatre n'ont pas d'effet sur le modèle d'étalonnage, ce qui réduit la taille du vecteur $\Delta\xi$ à $17*1$ et la taille de la matrice jacobienne généralisée à $17*3$:

$$\Delta\xi = (\Delta\beta_1, \Delta\beta_3, \Delta\beta_4, \Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \Delta\alpha_3, \Delta d_1, \dots, \Delta d_5, \Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_5)^t \quad (7)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_x^c}{\partial \beta_1} & \frac{\partial p_x^c}{\partial \beta_3} & \frac{\partial p_x^c}{\partial \beta_4} & \frac{\partial p_x^c}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial p_x^c}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial p_x^c}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial p_x^c}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial p_x^c}{\partial d_5} \\ \frac{\partial p_y^c}{\partial \beta_1} & \frac{\partial p_y^c}{\partial \beta_3} & \frac{\partial p_y^c}{\partial \beta_4} & \frac{\partial p_y^c}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial p_y^c}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial p_y^c}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial p_y^c}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial p_y^c}{\partial d_5} \\ \frac{\partial p_z^c}{\partial \beta_1} & \frac{\partial p_z^c}{\partial \beta_3} & \frac{\partial p_z^c}{\partial \beta_4} & \frac{\partial p_z^c}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial p_z^c}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial p_z^c}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial p_z^c}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial p_z^c}{\partial d_5} \\ \frac{\partial p_x^c}{\partial \theta_1} & \frac{\partial p_x^c}{\partial \theta_2} & \frac{\partial p_x^c}{\partial \theta_3} & \frac{\partial p_x^c}{\partial r_1} & \frac{\partial p_x^c}{\partial r_2} & \frac{\partial p_x^c}{\partial r_5} \\ \frac{\partial p_y^c}{\partial \theta_1} & \frac{\partial p_y^c}{\partial \theta_2} & \frac{\partial p_y^c}{\partial \theta_3} & \frac{\partial p_y^c}{\partial r_1} & \frac{\partial p_y^c}{\partial r_2} & \frac{\partial p_y^c}{\partial r_5} \\ \frac{\partial p_z^c}{\partial \theta_1} & \frac{\partial p_z^c}{\partial \theta_2} & \frac{\partial p_z^c}{\partial \theta_3} & \frac{\partial p_z^c}{\partial r_1} & \frac{\partial p_z^c}{\partial r_2} & \frac{\partial p_z^c}{\partial r_5} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Khalil [3] présume qu'un nombre d'équations égal ou supérieur à cinq fois le nombre de paramètres à identifier donne des résultats satisfaisants. D'où, le nombre de configurations de mesures N doit être supérieur à 29. Dans notre étude, afin de couvrir le maximum du volume de travail, on a choisi 56 points de mesures, tous dans le plan $z=215\text{mm}$.

Pour chaque point de mesure i on a :

$$\Delta X_{pi} = \begin{bmatrix} \Delta p_{xi}^C \\ \Delta p_{yi}^C \\ \Delta p_{zi}^C \end{bmatrix} = \Psi_i \cdot \Delta \xi \quad (9)$$

En fusionnant, on trouve :

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{p1} \\ \vdots \\ \Delta X_{pN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta p_{x1}^C \\ \Delta p_{y1}^C \\ \Delta p_{z1}^C \\ \vdots \\ \Delta p_{xN}^C \\ \Delta p_{yN}^C \\ \Delta p_{zN}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \vdots \\ \Psi_N \end{bmatrix} \Delta \xi \quad (10)$$

Si on pose :

$$\Delta P = \begin{bmatrix} \Delta X_{p1} \\ \vdots \\ \Delta X_{pN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta p_{x1}^C \\ \Delta p_{y1}^C \\ \Delta p_{z1}^C \\ \vdots \\ \Delta p_{xN}^C \\ \Delta p_{yN}^C \\ \Delta p_{zN}^C \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$W = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \vdots \\ \Psi_N \end{bmatrix} \quad (12)$$

Où :

- ΔP : est le vecteur d'écart global entre les situations de l'organe terminal réelles et les situations désirées (de dimension $3N \times 1$).
- W : est la matrice jacobienne globale du modèle d'identification (de dimension $3N \times 17$).

Ainsi, on aboutit au modèle d'étalonnage qui est donné par la relation suivante :

$$\Delta \xi = W^+ \Delta P \quad (13)$$

avec :

- W^+ : est la pseudo-inverse de la matrice jacobienne globale (de dimension $17 \times 3N$).

3. Résultats de simulation

Afin de tester l'efficacité du modèle d'étalonnage élaboré on impose un vecteur de paramètres réels ξ_r .

La simulation de l'étalonnage est décrite par les étapes suivantes :

1. Initialisation :

- ✓ Calculer les positions réelles des 56 points choisies en injectant les variables articulaires de ces points et les paramètres réelles ξ_r dans l'équation (5).
- ✓ $j=0$.

2. $j=j+1$,

3. Calculer les positions désirées des 56 points avec la même équation et les mêmes variables articulaires que 1) mais en injectant les paramètres nominaux ξ_n .
4. Calculer ΔP et W .
5. A l'aide de l'équation (13), calculer $\Delta \xi$.
6. Mettre à jours les paramètres nominaux $\xi_n : \xi_n = \xi_n + \Delta \xi$.
7. Si $j \leq \text{nombre d'itérations } (N_{ité})$ alors aller à (2).
8. Fin.

En pratique, le teste d'arrêt (la fonction objectif) ce n'est pas le nombre d'itérations mais c'est la précision recherchée ρ et il s'écrit comme suit:

$$\text{Max } |\Delta P| \leq \rho \quad (14)$$

Cependant à cause du temps de calcul très considérable d'une part, et de la convergence de l'algorithme non assurée à ce stade de l'autre part, on a opté à fixer le nombre d'itérations $N_{ité}$.

Pour les simulations, l'écart entre les paramètres réels supposés et nominaux est donné par le tableau 1. Il est à signaler, que ces valeurs sont comparables à celles trouvées dans la littérature [8,9].

Tableau 1 : Ecart entre les paramètres géométriques réels supposés et nominaux.

i	$\Delta \beta_i = \beta_{ir} - \beta_{in}$ (rad)	$\Delta \alpha_i = \alpha_{ir} - \alpha_{in}$ (rad)	$\Delta d_i = d_{ir} - d_{in}$ (mm)	$\Delta \theta_i = \theta_{ir} - \theta_{in}$ (rad)	$\Delta r_i = r_{ir} - r_{in}$ (mm)
1	0.009	0.005	0	0	0.1
2	0	0.0001	-0.1	0	1
3	-0.0001	0.0009	-1	0	-0.1
4	0.004	0	0.1	0	0.1
5	0	0	0	0	0.1

Sur les figures 2 et 3 nous avons tracé les erreurs de positionnement de l'organe terminal avant et après l'étalonnage. Ces figures montrent clairement que l'étalonnage a amélioré d'une façon significative la précision dans les 56 points de mesures. En effet, l'erreur qui fluctuait entre 2 et 4mm avant l'étalonnage, est devenue inférieure à 2×10^{-13} mm après 100 itérations. Ce résultat est comparable à celui trouvé par English [9].

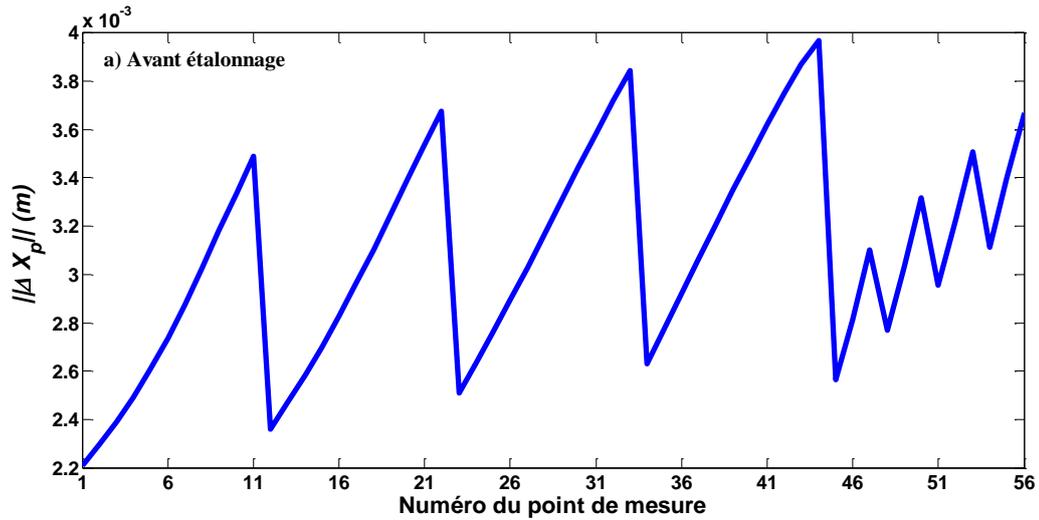


Figure 2 : L'erreur de positionnement avant étalonnage.

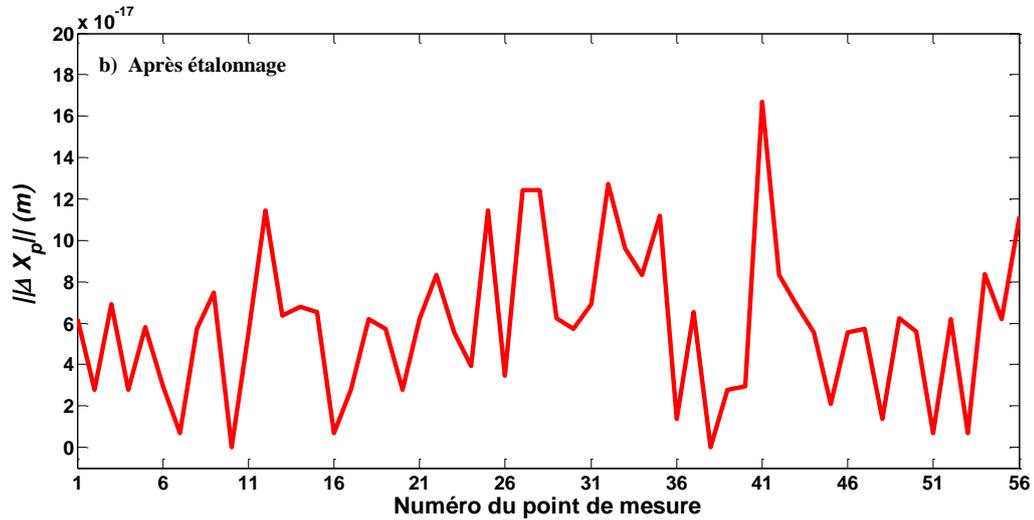


Figure 3 : L'erreur de positionnement après étalonnage pour 100 itérations.

Le tableau 2 donne les paramètres géométriques identifiés avec le pourcentage d'erreur par rapport aux valeurs de paramètres réels supposés. Ainsi, on constate que la procédure d'étalonnage a identifié exactement les 17 paramètres donnés par l'équation 7.

Tableau 2: Ecart entre les paramètres géométriques identifiés et les paramètres réels supposés.

i	$\Delta\beta_i$ identifié		$\Delta\alpha_i$ identifié		Δd_i identifié		$\Delta\theta_i$ identifié		Δr_i identifié	
	(rad)	Erreur %	(rad)	Erreur %	(mm)	Erreur %	(rad)	Erreur %	(mm)	Erreur %
1	0.0090	0	0.0050	0	0	0	0	0	0.1	0
2	0*	0	0.0001	0	-0.1	0	0	0	1	0
3	-0.0001	0	0.0009	0	-1	0	0	0	0*	100
4	0.0040	0	0*	0	0.1	0	0*	0	0*	100
5	0*	0	0*	0	0	0	0*	0	0.1	0

* : paramètres non identifiés

Pour les autres paramètres non-identifiés, quatre d'entre eux ($\Delta\alpha_4, \Delta\alpha_5, \Delta\theta_4$ et $\Delta\theta_5$) n'ont pas d'effet sur la précision du fait que les colonnes correspondantes à ces paramètres dans la matrice jacobienne généralisée sont nulles [3]. Tandis que l'effet du reste de ces paramètres non-identifiés est regroupé avec d'autres paramètres identifiés [3].

La convergence de la procédure d'étalonnage est illustrée par la figure 4. On constate que le programme donne des résultats satisfaisants. En effet, l'erreur est de l'ordre de 10^{-10} m dès la quatrième itération. Alors que English et al. [9] ont trouvé après deux itération, seulement, une erreur de l'ordre de 10^{-13} m. Cependant les grandeurs des erreurs de paramètres géométriques supposées dans leurs travail sont inférieures à celles prises dans notre travail (erreur maximale sur les angles : 0.0010rad et erreur maximale sur les longueurs : 0.078mm). Après 100 itérations, l'erreur est devenue de l'ordre de 10^{-16} m. En revanche, ce gain de précision est très couteux en temps de calcul. En effet, il a fallu à un processeur « I3 CPU 2.4 GHz » 59.0533 minutes pour exécuter 100 itérations.

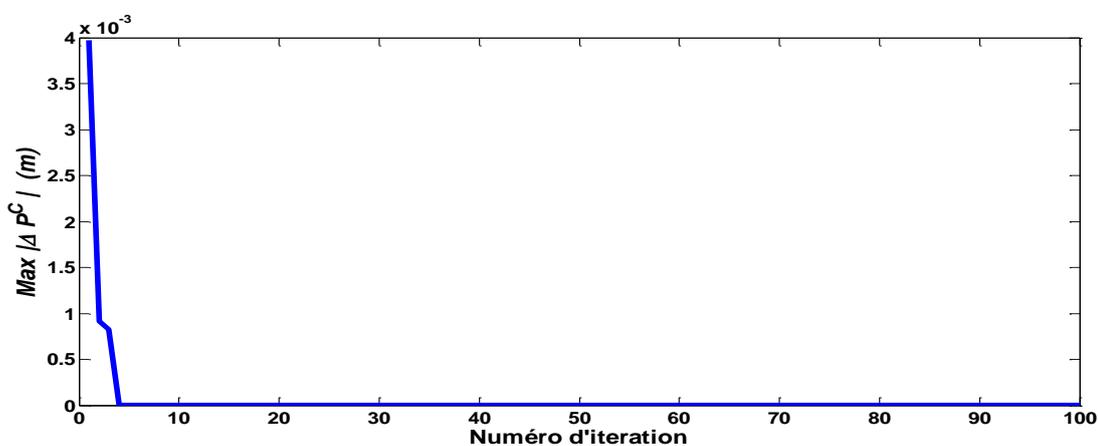


Figure 4 : L'erreur maximale en fonction du numéro d'itération.

4. Précision dans l'espace de travail

Dans de nombreuses applications industrielles, les robots doivent occuper le maximum du volume de travail. Par conséquent, le robot après l'étalonnage devrait avoir le même niveau de précision à travers son espace de travail [8]. Or que l'étalonnage augmente la précision du robot dans les configurations de mesures choisies.

Ainsi, pour tester la validité de l'étalonnage sur la précision du robot dans l'ensemble de son espace de travail, on a choisi arbitrairement 3600 positions dans le plan $z=215$ mm.

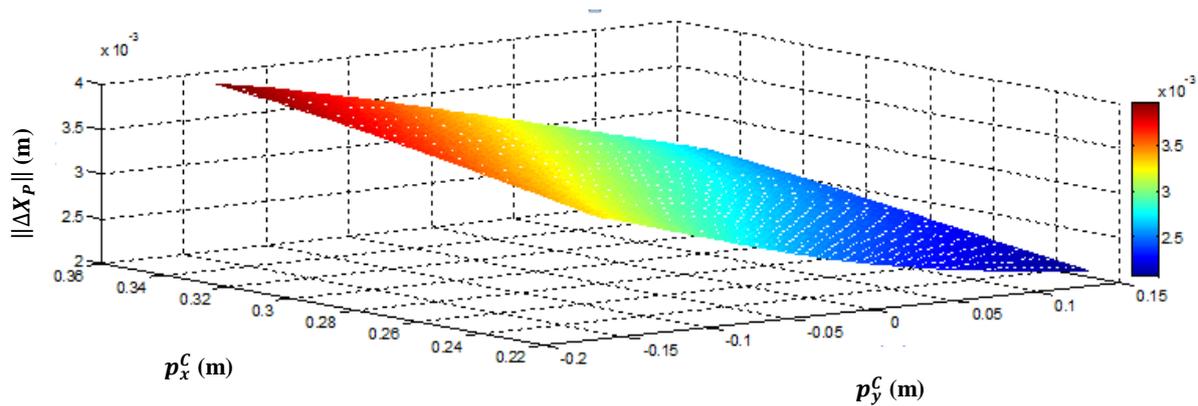


Figure 5 : L'erreur de positionnement avant étalonnage dans le plan $z=215$.

La figure 5 présente la variation des erreurs de positionnement dans le plan $z=215$ mm avant étalonnage. On constate que les erreurs augmentent dans le sens des p_y^c négatives avec l'augmentation de p_x^c . Cependant, les grandeurs de ces erreurs sont presque identiques à celles trouvées pour les 56 configurations de mesures.

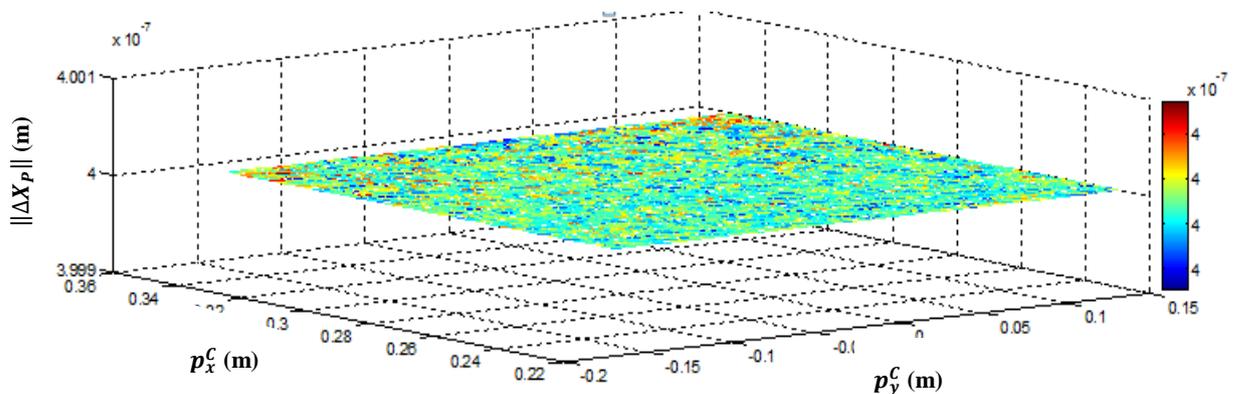


Figure 6 : L'erreur de positionnement après étalonnage dans le plan $z=215$.

La figure 6 montre que les erreurs, après étalonnage, sont devenues de l'ordre de 4×10^{-7} m, ainsi la précision est moindre que celle enregistrée dans les points de mesures. Cependant 0.0004mm est une bonne précision comparée à la répétabilité du robot qui est de 0.02mm. De plus, on constate que les erreurs de positionnement dans les 3600 points sont presque identiques.

5. Conclusion

Ce travail présente un modèle d'étalonnage du robot RV-2AJ qui permet d'identifier ces paramètres géométriques réels. A cet effet, nous dégagons les constatations suivantes :

- Le nombre de paramètres à identifier dépend de la méthode d'étalonnage choisie ainsi que du conditionnement de la matrice jacobienne globale. Dans notre étude, la méthode choisie est basée sur le calcul de l'écart entre la position réellement atteinte et la position désirée. Ainsi, seulement 17 paramètres sont identifiables des 25 paramètres géométriques du robot RV-2AJ.
- La phase de simulation a donné des résultats satisfaisants. En effet, non seulement le programme converge rapidement mais aussi la précision dans 56 points, qui était de l'ordre de 4mm, est nettement améliorée est devenue inférieure à 2×10^{-13} mm.

- Le test du niveau de précision à travers l'espace de travail du robot a confirmé la validité de l'étalonnage en trouvant des erreurs de positionnement après étalonnage de 0.004mm.

Références

1. T. Niaritsiry, « Optimisation de la conception du robot parallèle delta cube de très haute précision ». Thèse de Doctorat N° 3567, faculté sciences et techniques de l'ingénieur, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.
- 2.A. Olabi, « Amélioration de la précision des robots industriels pour des applications d'usinage à grande vitesse », thèse de doctorat à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Arts et Métiers ParisTech, 2011.
3. W. Khalil & E. Dombre. "Modeling, Identification and Control of Robots", Butterworth Heinemann, ISBN: 978-1-903996-66-9, 2004
4. A.Joubair. "Contribution à l'amélioration de la précision absolue des robots parallèles", Thèse de Doctorat à l'Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, 2012.
5. J.-F. Quinet et P. Maurine, « Étalonnage des robots industriels », techniques de l'ingénieur, Référence S7733, 2006.
6. A. Yousnadj. « La robotique et son environnement : Rétrospective et aperçu général sur les bras manipulateurs » Actes des Journées d'Etudes sur la Robotique et son Environnement, ENITA, ROB' 95, 16-18 Septembre 1995.
7. J.Denavit, R-S. Hartenberg, "A Kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices", J. of applied Machanics, 1955.
8. H.-N. Nguyen , J. Zhou and H-J. Kang, "A New Full Pose Measurement Method for Robot Calibration", *Sensors* 2013, 13(7), 9132-9147; doi:10.3390/s130709132
9. K. English, M.J.D. Hayes, M. Leitner, C. Sallinger, May, "Kinematic Calibration of Six-Axis Robots", Proceedings of the CSME Forum 2002, Queen's University, Kingston, ON, Canada, on CD, 2002.
10. R. Judd, et A. Knasinski. « A technique to calibrate industrial robots with experimental verification». *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.6, n° 1, p. 20-30, 1990.
11. Mitsubishi, "*Mitsubishi RV-2AJ Specifications Manual*", 2010.
12. A. Flitti, « protocole de travaux pratique en Robotique », séminaire international sur les nouvelles approches pédagogiques dans les enseignements de travaux pratiques dans le système L.M.D, Mostaganem, 22-24 Mai 2011.