

Optimisation du contrôle géométrique des tubes cintrés du système de freinage

NEJJAR Saif ddin, EL MOUSSAMI Haj, DAHBI Samya
Equipe de recherche: Mécanique et Ingénierie Intégrée
ENSAM-Meknès, Université Moulay Ismail
Meknès, Maroc
saifnejjar@gmail.com, hajelmoussami@yahoo.com,
samy.ensam@gmail.com

EZZINE Latifa
Equipe de recherche: Modélisation, Contrôle des systèmes
et Télécommunications
EST-Meknès, Université Moulay Ismail
Meknès, Maroc
latifae@yahoo.com

Résumé— Le travail présenté dans cet article concerne l'optimisation du contrôle géométrique des tubes cintrés, utilisés dans le secteur automobile. Cette optimisation vise à minimiser les écarts géométriques moyens, déterminés par ce contrôle et influencés par les positions de trois bras magnétiques. Tout d'abord, nous avons utilisé un système expérimental et un plan factoriel complet de trois facteurs à deux niveaux pour effectuer les expériences. Ensuite, les réponses en fonction des facteurs et leurs interactions ont été modélisées par une régression multiple. Les modèles développés ont des coefficients de détermination supérieurs à 90%. Finalement, les positions optimales des trois bras magnétiques sont déterminées par un diagramme d'optimisation.

Mots-clés—Plan d'expériences ; régression multiple ; diagramme d'optimisation ; bras magnétique ; écarts géométriques moyens, bras robot.

Abstract—The work presented in this paper is focused on optimization of the geometrical control of bent tubes, used in the automobile field. This optimization aims to minimize the means geometrical deviations, determined by this control and influenced by the positions of three magnetic arms. First, we used an experimental system and a full factorial design with three factors and two levels to conduct the experiments. Then, the responses in function of factors and their interactions were modeled using multiple linear regression. The developed models had coefficients of determination higher than 90%. Finally, the optimal positions of the three magnetic arms were determined by an optimization diagram.

Keywords: Design of experiments, multiple regression, optimization diagram, magnetic arms, means geometrical deviations; robot arm.

I. INTRODUCTION

Face à une compétitivité accrue, les entreprises opérantes dans le secteur automobile s'orientent de plus en plus à l'automatisation des processus et l'emploi des robots pour optimiser les contrôles qualité de leurs produits [1]. Dans ce contexte, les tubes cintrés, utilisés dans le système de freinage, doivent être contrôlés d'une manière fiable et précise pour garantir une sécurité élevée du client.

En contrôle tridimensionnel [2,3], Les machines de mesure tridimensionnelle *MMT* effectuent le contrôle géométrique des tubes cintrés du système de freinage et offrent des résultats très satisfaisants [4,5]. En plus, les outils de métrologie permettant la vérification de la conformité de la géométrie d'un tube cintré par rapport au tube étalon sont devenus très sophistiqués et plus précis [6]. Pour cela, les industriels font appel à des bras robots d'une grande précision [7]; assistés par des capteurs sans contact ; spécialement conçus pour mesurer des tubes, fils et durites.

Selon la norme *ISO 10360-2 : 1990*, une *MMT* est un « dispositif de mesure utilisé à poste fixe, conçu pour effectuer des mesurages à partir d'au moins trois déplacements linéaires ou angulaires générés par la machine. L'un au moins doit être une mesure linéaire ». L'évolution des produits et l'arrivée de nouvelles technologies font que cette définition disparaît de cette norme lors de sa mise à jour en 2000 pour apparaître dans la norme *ISO 10360-1 : 2000*, définissant le vocabulaire de l'ensemble de ces normes *ISO 10360*, en se voulant moins restrictive quant à la technologie et la structure employée : « système de mesure avec des moyens pour déplacer un système de palpation et capacité à déterminer des coordonnées spatiales sur la surface d'une pièce ».

Il existe 4 structures principales de *MMT* : structure portique, structure pont mobile, structure potence (ou bras horizontal) et structure cantilever. Chaque structure répond à un besoin dépendant du volume de contrôle et de précision. Cependant, le principe de fonctionnement reste le même : trois guidages orthogonaux deux à deux repérés par les trois dernières lettres de l'alphabet *X*, *Y* et *Z* ; *X* et *Y* représentent les axes horizontaux, l'axe vertical étant communément appelé *Z*.

Depuis quelques années, le marché des *MMT* connaît l'arrivée de nouveaux outils de mesure tridimensionnelle, appelés systèmes de mesure *3D* portables ou bras robots. Ces machines, très peu précises lors de leur apparition sur le marché (plusieurs dixièmes de *mm* dans un volume d'un *m³*) ont fait d'énormes progrès ces cinq dernières années. Les bras

robots actuels offrent des précisions comparables à celles obtenues par une machine conventionnelle à bras horizontal.

Ces bras robots permettent à leurs utilisateurs de vérifier facilement la qualité de leurs produits en réalisant des inspections 3D, des certifications d'outils, des comparaisons à la CAO (Conception Assistée par Ordinateur), des analyses dimensionnelles, la rétro-ingénierie de composants, etc.

Pour le contrôle géométrique des tubes cintrés, les bras robots les plus utilisés sont de type « sans contact ». Ce contrôle est effectué par une technologie infrarouge et laser sans contact. Il présente les avantages suivants : pas de flexion du tube pendant la mesure, traitement d'angles de courbure de 180°, option pour déplacer les tubes pendant la mesure et la réduction maximale du temps d'arrêt pour l'inspection de nouveaux tubes.

Dans notre étude, nous nous intéressons au contrôle géométrique d'un tube cintré, effectué par un bras robot sans contact. Ce bras robot mesure les écarts géométriques moyens entre le tube cintré, posé sur une table à 3 bras magnétiques, et un tube étalon. Ces écarts sont influencés par les positions de ces bras magnétiques. Notre objectif consiste à optimiser ce contrôle en cherchant les positions de ces bras qui minimiseront les écarts géométriques moyens mesurés.

Pour ce faire, une démarche scientifique est adoptée. En premier lieu, un système expérimental et un plan factoriel complet ont été employés pour effectuer les expériences. En second lieu, les réponses en fonction des facteurs et leurs interactions ont été modélisées par une régression multiple. Finalement, les positions optimales des 3 bras magnétiques sont déterminées par un diagramme d'optimisation.

II. METHODES UTILISEES

L'objectif de notre étude est de trouver les positions optimales des 3 bras magnétiques pour minimiser les écarts géométriques moyens, mesurés par le bras robot selon l'équation (1) :

$$E_m = (e_x^2 + e_y^2 + e_z^2)^{1/2} \quad (1)$$

Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé un plan factoriel complet pour effectuer les expériences. Nous avons également modélisé les écarts géométriques moyens par une régression multiple.

Le plan factoriel complet est une méthode de réalisation des expériences permettant d'estimer les effets des facteurs susceptibles d'influencer le comportement de la réponse à appréhender [8]. En effet, le nombre d'expériences à réaliser dans le cas de n facteurs à deux niveaux est 2^n expériences. Le plan factoriel complet présente l'avantage de donner plus d'information permettant ainsi de mieux apprécier les effets des facteurs et leurs interactions par rapport à un plan fractionnaire [9]. Il présente aussi l'avantage d'être simple sur le plan technique. Néanmoins, si le nombre d'expériences est

élevé, son utilisation devient lourde et peut engendrer un coût de réalisation élevé.

Vu ces avantages et compte tenu du nombre réduit des facteurs dans notre étude, nous avons choisi un plan factoriel complet de 3 facteurs à 2 niveaux, donc 8 expériences à effectuer. Les facteurs sont les positions des bras magnétiques et la réponse correspond aux écarts géométriques moyens.

La méthode de modélisation des données pour laquelle nous avons opté est la régression multiple. C'est l'outil statistique le plus habituellement mis en œuvre pour l'étude des données multidimensionnelles. C'est une méthode de modélisation des données qui consiste à expliquer la variation d'une variable quantitative Y ; dite variable dépendante; par celle d'une ou plusieurs variables appelées indépendantes: X_1, \dots, X_k [10,11]. Le modèle de régression multiple d'ordre 2 s'écrit (2) :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i,j} a_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

Où a_0 est une constante, les a_i et a_{ij} représentent les coefficients de régression. Ces coefficients sont estimés de manière à ce que la somme des carrés des résidus : $\sum_{i=1}^k e_i^2$ soit minimale. Nous parlerons dès lors d'une régression au sens des moindres carrés [10].

L'adéquation du modèle est exprimée par le coefficient de détermination qui exprime la fraction de la variabilité de la variable de dépendance au moyen de l'équation de régression.

L'objectif de notre étude est de minimiser 4 sorties à la fois. Pour cela, nous avons utilisé la fonction désirabilité proposée par Derringer et Suich [12] et qui figure dans de nombreux logiciels de plans d'expériences. La désirabilité globale D , c'est-à-dire qui prend en compte à la fois les exigences sur toutes les réponses, est la moyenne géométrique des désirabilités individuelles d_i . La désirabilité D est déterminée par l'équation (3) :

$$D = (d_1 d_2 \dots d_n)^{1/n} \quad (3)$$

La valeur de la désirabilité varie, en fonction des niveaux de facteurs, dans l'intervalle [0,1]. La valeur 1 correspond à une satisfaction maximale et la valeur 0 correspond à un refus complet.

On peut aboutir à plusieurs situations :

- La désirabilité globale est égale à 1 lorsque tous les objectifs sont atteints. Dans ce cas toutes les désirabilités individuelles sont égales à 1.
- La désirabilité globale est égale à 0 si l'un au moins des objectifs n'est pas atteint. Dans ce cas l'une au moins des désirabilités individuelles est égale à 0.
- La désirabilité globale est comprise entre 0 et 1 quand certains objectifs sont complètement atteints et d'autres partiellement seulement. Dans ce cas aucune désirabilité individuelle n'est égale à 0 et les désirabilités ne sont pas toutes égales à 1.

Le meilleur compromis pour l'ensemble des sorties est obtenu pour la plus forte valeur de la désirabilité globale.

III. SYSTEM EXPERIMENTAL

Dans cette partie, nous présentons le système expérimental que nous avons réalisé pour l'optimisation de la position des 3 bras magnétiques. Cette optimisation vise à minimiser les écarts géométriques moyens, déterminés par le contrôle géométrique des tubes cintrés.

Le système expérimental représenté sur la Fig. 1 nous a permis d'effectuer le contrôle d'un tube cintré.

Nous avons effectué les expériences du contrôle en posant le tube sur les 3 bras magnétiques montés sur une table. La position de chaque bras est repérée par un système d'indexage à base d'alphabets et de chiffres.

Nous avons balayé le tube cintré par le Vé du bras robot (Fig. 2). Le logiciel installé sur l'unité de traitement des données ; a réalisé la comparaison en 3 dimensions entre la géométrie du tube cintré et la géométrie du tube étalon et a mesuré la valeur de l'écart géométrique moyen E_m . Nous avons effectué les mesures en 4 points jugés critiques (Fig. 3) puisqu'ils peuvent entrer en contact avec des composants adjacents en phase de montage.

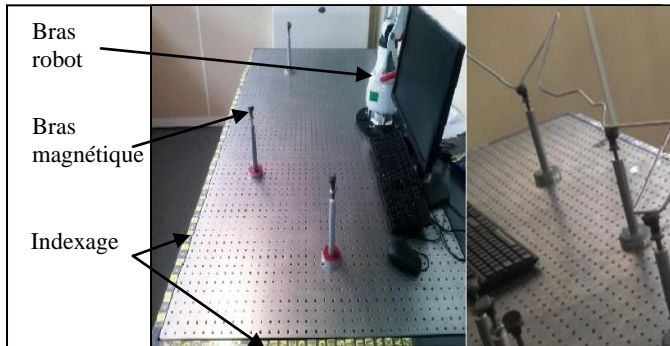


Fig.1. Système expérimental et tube en contrôle géométrique.

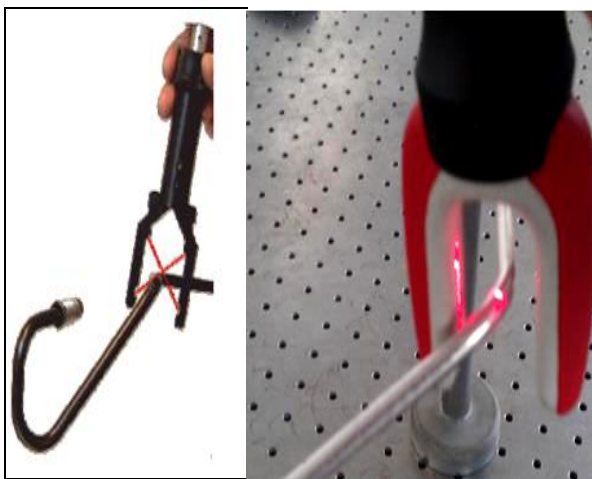


Fig. 2. Balayage du tube par le Vé du bras robot.

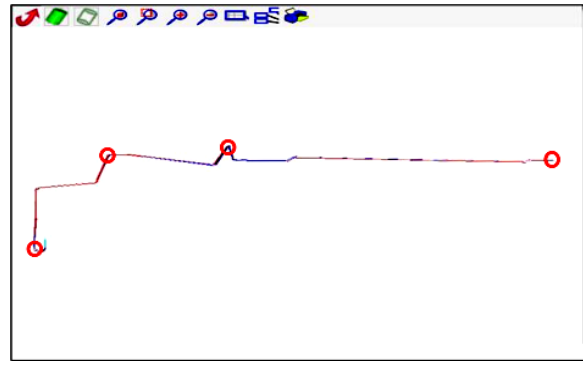


Figure 3. Les 4 points critiques d'un tube cintré.

Les positions des bras magnétiques ont une influence sur les résultats du contrôle géométrique. Donc, les facteurs sont les positions des bras magnétiques, notées P_i .

Pour chaque facteur P_i , nous avons considéré 2 niveaux appartenant au domaine de validité des contrôles de géométrie. Le Tableau 1 représente les facteurs et leurs niveaux.

Nous avons utilisé un plan factoriel complet pour réaliser les expériences. Pour chaque expérience, et pour chaque point critique PC_i , nous avons déterminé l'écart géométrique moyen E_{mi} . Les résultats sont représentés dans le Tableau 2.

IV. RESULTATS

Pour modéliser les écarts géométriques moyens E_{mi} au niveau des 4 points critiques PC_i , nous avons effectué une régression multiple en utilisant le logiciel *Minitab 17*. Les Equations (4-7) représentent les modèles obtenus.

$$E_{m1} = 4.890 + 1.493*P_1 + 2.165*P_2 - 0.437*P_3 - 0.612*P_1*P_2 - 0.785*P_1*P_3 - 0.447*P_2*P_3 \quad (4)$$

$$R_1^2 = 96.79 \%$$

$$E_{m2} = 5.329 + 1.466*P_1 + 2.531*P_2 - 1.061*P_3 - 0.431*P_1*P_2 - 0.864*P_1*P_3 - 0.049*P_2*P_3 \quad (5)$$

$$R_2^2 = 98.36 \%$$

$$E_{m3} = 3.848 + 1.863*P_1 + 1.262*P_2 - 1.612*P_3 + 0.222*P_1*P_2 + 0.142*P_1*P_3 - 0.698*P_2*P_3 \quad (6)$$

$$R_3^2 = 97.67 \%$$

$$E_{m4} = 5.121 + 1.564*P_1 + 1.481*P_2 - 0.331*P_3 - 0.871*P_1*P_2 - 0.229*P_1*P_3 - 0.576*P_2*P_3 \quad (7)$$

$$R_4^2 = 90.01 \%$$

TABLEAU 1. FACTEURS ET NIVEAUX.

Facteurs	Niveaux	
	-I	+I
P_1	57 I	57 B
P_2	17 H	15 C
P_3	8 T	8 L

TABLEAU 2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.

Exp. N°	P ₁	P ₂	P ₃	E _{m1}	E _{m2}	E _{m3}	E _{m4}
1	1	1	1	5.74	6.50	5.47	5.35
2	1	-1	1	4.58	3.24	3.01	6.90
3	-1	1	-1	5.75	6.65	5.92	5.78
4	-1	-1	-1	0.35	1.47	1.56	1.54
5	-1	-1	1	0.89	0.33	0.33	0.87
6	-1	1	1	6.60	7.00	0.13	6.04
7	1	-1	-1	5.08	6.15	5.44	5.25
8	1	1	-1	10.13	11.29	8.92	9.24

Pour les 4 points critiques, nous avons obtenu des coefficients de détermination R^2 élevés, ce qui prouve que nos modèles estiment correctement les écarts géométriques moyens en fonction des 3 facteurs choisis et leurs interactions.

L'optimisation des positions des 3 bras magnétiques vise à minimiser les écarts géométriques moyens lors du contrôle des tubes cintrés.

Nous avons réalisé notre optimisation par l'outil « Optimisation des réponses » du logiciel *Minitab 17*, qui permet d'identifier la combinaison optimale des niveaux de facteurs minimisant plusieurs réponses simultanément.

L'identification de la combinaison optimale est basée sur la fonction de désirabilité, qui permet de minimiser à la fois les écarts géométriques moyens au niveau des 4 points critiques. Le Tableau 3 indique les paramètres d'optimisation.

La Fig. 5 représente le diagramme d'optimisation obtenu. En effet, la désirabilité globale souhaitée ($D=1$) correspond à une satisfaction maximale par l'obtention des valeurs cibles ($E_{mi}=0$) pour les 4 réponses, or qu'elle est minimale ($D=0$) si les 4 sorties sont à leurs valeurs maximales obtenues lors de la réalisation des essais.

TABLEAU 3. PARAMETRES D'OPTIMISATION.

Réponse	Cible	Supérieur
E _{m1}	0	10.13
E _{m2}	0	11.29
E _{m3}	0	8.92
E _{m4}	0	9.24

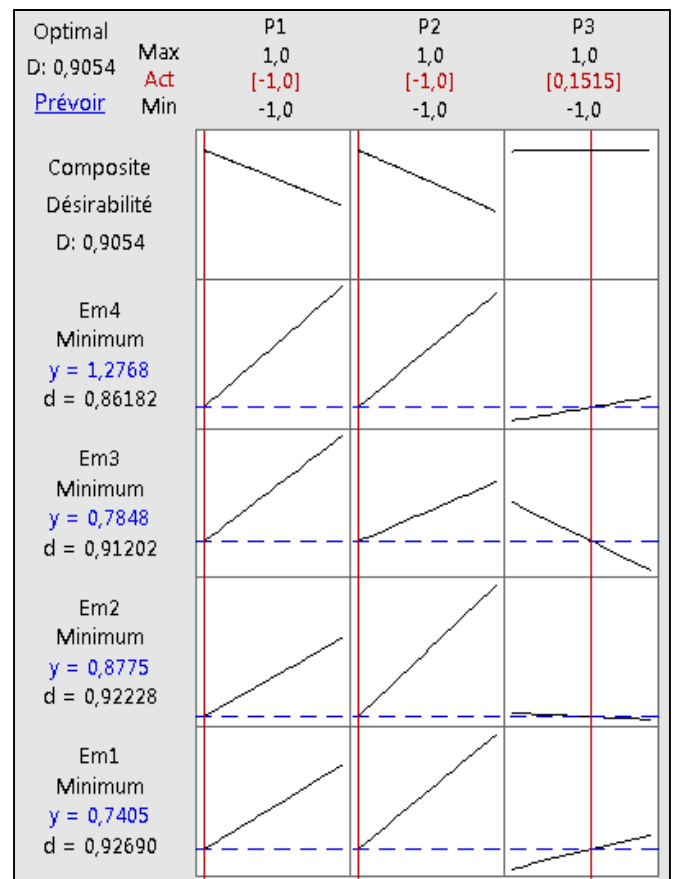


Fig. 5. Diagramme d'optimisation.

Le diagramme d'optimisation illustre l'effet de la position de chaque bras P_i (colonnes) sur les écarts géométriques moyens E_{mi} (lignes). Les lignes verticales rouges et les chiffres correspondants indiquent les niveaux des facteurs optimaux. Les lignes horizontales bleues et les chiffres correspondants représentent les écarts géométriques moyens par rapport aux niveaux des facteurs optimaux trouvés.

Le diagramme indique que les E_{mi} sont minimisés, pour une valeur de désirabilité globale égale à **0,9054**, lorsque les facteurs P_1 et P_2 sont définis sur leur niveau -1 et P_3 sur le niveau 1 .

Donc pour minimiser les écarts géométriques moyens au niveau des 4 points critiques, les positions des 3 bras magnétiques doivent être comme suit (Tableau 1):

- Bras 1 : 57 I ;
- Bras 2 : 17 H ;
- Bras 3 : 8 L.

V. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons optimisé le contrôle géométrique des tubes cintrés du système de freinage. Ce contrôle consiste à poser le tube à contrôler sur 3 bras magnétiques fixés sur une table selon un indexage à base

d'alphabets et chiffres, puis mesurer les écarts géométriques moyens entre ce tube et un tube étalon par un bras robot sans contact. Ces écarts sont fortement influencés par les positions des bras magnétiques.

Cette optimisation nous a permis de déterminer les positions optimales des 3 bras magnétiques qui minimiseront les écarts géométriques moyens mesurés par le bras robot.

Tout d'abord, nous avons utilisé un plan factoriel complet pour réaliser les expériences et mesurer les écarts géométriques moyens au niveau de 4 points critiques du tube cintré. Le plan d'expériences a inclus 3 facteurs (positions des 3 bras magnétiques) à 2 niveaux.

Ensuite, nous avons modélisé l'écart géométrique moyen au niveau de chaque point critique par la régression multiple. Nous avons obtenu un coefficient de détermination R^2 très élevé pour chaque réponse, ce qui montre que les modèles développés estiment correctement les réponses.

Finalement, nous avons déterminé les positions optimales des 3 bras magnétiques qui minimisent les écarts géométriques moyens lors du contrôle des tubes cintrés. Cette détermination a été basée sur la fonction de désirabilité et le diagramme d'optimisation. Les écarts géométriques moyens sont minimaux quand les positions des bras magnétiques 1 et 2 sont au niveau 1 et le bras 3 au niveau -1. Selon le système d'indexage adopté dans notre étude, ces positions sont :

- Bras 1 : 57 I ;
- Bras 2 : 17 H ;
- Bras 3 : 8 L.

Dans nos futures études, nous envisageons développer d'autres méthodes d'optimisation du contrôle géométrique issues de l'intelligence artificielle. Ces méthodes nous permettront de déterminer les positions optimales des 3 bras magnétiques qui minimiseront davantage les écarts géométriques moyens et augmenteront la qualité du contrôle des tubes cintrés.

REFERENCES

- [1] J. J. Craig, Introduction to robotics : mechanics and control, 3^{ème} éd., Upper Saddle River, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2005.
- [2] M. Dujardin, "Le scanner laser 3D : reconnaissance de formes et modélisation de déformation," Mémoire d'ingénieur CNAM, École Supérieure des Géomètres et Topographes, Conservatoire National des Arts et Métiers, France, 2013.
- [3] O. Faugeras, Three-Dimensional Computer Vision : A geometric viewpoint, MIT Press Cambridge, 1993.
- [4] D. Mailhot, "Amélioration de la précision d'un bras robotisé pour une application d'ébavurage," Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal, 1990.
- [5] American Society of Mechanical Engineers, "Method for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machine," ASME, 2005.
- [6] J. Otepka, "Precision Target Mensuration in Vision Metrology," Université de Technologie de Vienne, Vienne, 2004.
- [7] J. Larue, M. Viala, D. Brown et C. Mony, "Contribution des technologies optiques à l'amélioration des performances de la mesure tridimensionnelle en atelier," Creaform France (www.creaform3D.com).

- [8] D.C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 4^{ème} éd., John Wiley et Sons, New York, 2001.
- [9] J. Goupy et L. Creighton, Introduction aux plans d'expériences, 3^{ème} éd., Dunod, Paris, 2006.
- [10] G. Saporta, Probabilités, analyse des données, Statistiques. Technip, Paris, 1991.
- [11] J. Holubiec, "Application de la régression multiple dans l'estimation des consommations partielles d'énergie électrique," Revue de statistique appliquée, tome 21, n°2, 1973, pp. 93-98.
- [12] D. Derringer, R. Suich, "Simultaneous optimisation of several response variables," Journal of Quality Technology, vol. 12, 1980, pp. 214-219.