



HAL
open science

Etude du comportement cinématique d'un robot lors de la fabrication d'une tubulure avec les procédés WAAM

Antoine Baccomo, Hélène Chanal, Emmanuel Duc

► To cite this version:

Antoine Baccomo, Hélène Chanal, Emmanuel Duc. Etude du comportement cinématique d'un robot lors de la fabrication d'une tubulure avec les procédés WAAM. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784363

HAL Id: hal-04784363

<https://hal.science/hal-04784363v1>

Submitted on 15 Nov 2024

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.



Etude du comportement cinématique d'un robot lors de la fabrication d'une tubulure avec les procédés WAAM

Antoine BACCOMO^(a), Hélène CHANAL^(a), Emmanuel DUC^(a)

(a) Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000

Clermont-Ferrand, France

Mail : antoine.baccomo@sigma-clermont.fr

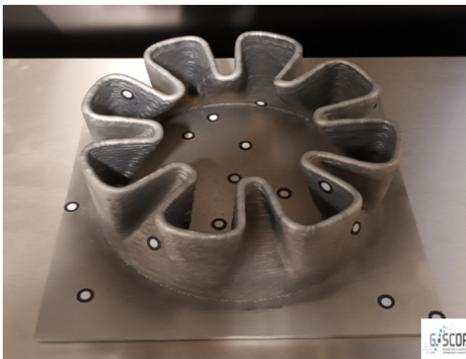
Résumé : Cet article s'intéresse à la fabrication des pièces mono-cordon de type tubulure avec le procédé WAAM robotisé. Les premiers retours d'expérience montrent des défauts de dépose au niveau des changements de direction. L'objectif des travaux est d'identifier l'impact du comportement du robot sur les défauts observés. Ainsi, la problématique principale repose sur la détermination de la vitesse de déplacement de la torche par rapport à la pièce. Pour ce faire, il faut établir dans un premier temps le modèle géométrique du robot avant d'en déterminer son modèle cinématique. Ce modèle permet à partir des relevés des différentes vitesses de rotation de chaque moteur de calculer la vitesse de la torche dans le repère pièce. Il est possible d'observer que le choix de la stratégie de gestion de la redondance d'axe, ainsi que des stratégies de synchronisation des mouvements du robot par la commande numérique a un impact sur le respect de la vitesse de dépose. Les premières analyses montrent une réduction puis une augmentation de la vitesse de la torche lors des changements de direction ce qui est cohérent avec les défauts observés sur la pièce fabriquée. Le comportement cinématique est une des clefs de la qualité de la pièce. Il est donc important de disposer d'une procédure de qualification de son comportement cinématique de manière à déterminer la capacité du robot à suivre une trajectoire.

Mots clés : Fabrication additive robotisée, WAAM, Trajectoire, multiaxes.

1 Introduction

Le procédé de fabrication additive, est une alternative aux procédés conventionnels d'obtention de préforme. La mise en mouvement de la torche de dépose peut se faire avec un robot, comme dans ces travaux.

Les travaux proposés dans cet article proviennent de l'analyse de la qualité géométrique de fabrication d'une pièce nommée "tulipe" (Figure 1a). La tulipe est fabriquée à l'aide du procédé WAAM. C'est une pièce mono mur construite par l'empilement de cordons simples. Visuellement des défauts apparaissent notamment sur les changements de direction de la torche (Figure 1b). Il est possible d'observer des amincissements du mur à certains endroits et du surplus de matière à d'autres.



(a) La "Tulipe"



(b) Discontinuités de dépose

Figure 1: Pièce étudiée

Le procédé WAAM couplé au procédé Cold Metal Transfert (CMT) permet une flexibilité de l'orientation de l'outil par rapport à la pièce, qui ne nuit pas à la qualité de la pièce (Fronius, 2014) (Jin et al., 2020). Ce procédé impose une vitesse de parcours de la trajectoire de dépose cohérente avec la vitesse de sortie du fil, pour garantir le bon apport local de matière.

La mise en mouvement de la buse est réalisée par un robot Yaskawa 6 axes MA1440 associé à une table rotative 2 axes MT250 S2D (Figure 2). Ainsi ces travaux ont pour but d'analyser l'impact du comportement cinématique de la cellule robotisée de dépose, sur les défauts observés sur la pièce.

Dans la plupart des cellules de fabrication, une mesure de la vitesse de la torche n'est pas possible.

Il est donc nécessaire de reconstruire la vitesse de la torche par rapport à la pièce à l'aide de la mesure des vitesses de chaque liaison motorisée du robot et de l'identification du modèle cinématique direct. Cette analyse permet d'observer s'il existe une corrélation entre les défauts observés sur la tulipe, et la vitesse reconstruite de la torche par rapport à la pièce.

Cet article introduira tout d'abord la définition du modèle géométrique de la cellule robotisée. Il présentera ensuite le modèle cinématique de la cellule, duquel sera déduit la vitesse de la torche par rapport à la pièce. Il conclura enfin sur les résultats obtenus.

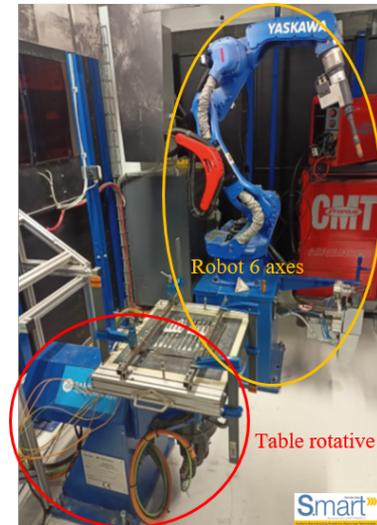


Figure 2: Cellule robotisée utilisée

2 Définition du modèle géométrique de la cellule robotisée

Le robot est programmé en définissant différents points de passage du point piloté de la torche (TCP) et son orientation dans le repère du programme. La cellule robotisée, est une cellule 8 axes. La gestion de la redondance se fait en imposant à la torche d'être verticale et au robot de se déplacer dans un plan perpendiculaire au premier axe de rotation de la table (axe z_7 sur la Figure 5). La commande numérique calcule alors la trajectoire de chaque axe en fonction du temps, influençant éventuellement ainsi le processus de dépose du fil.

L'objectif du modèle est de prédire la vitesse de dépose. Les travaux se focalisent donc sur l'identification du modèle géométrique implémenté dans la commande numérique implémenté dans le robot.

Dans un premier temps il sera présenté le modèle géométrique du robot 6 axes avant de proposer le modèle de la cellule complète. L'identification des paramètres sera détaillée ensuite.

2.1 Modèle géométrique de la cellule

La cellule de fabrication additive est composée de deux ensembles, un robot 6 axes et une table rotative (Figure 2). Les travaux se focalisent d'abord sur la détermination du modèle géométrique du robot 6 axes avant d'intégrer la table rotative.

2.1.1 Définition des paramètres géométriques

Il existe plusieurs formalismes pour modéliser les robots géométriquement (Sheth and Uicker Jr, 1971), (Renaud, 1975), (Khalil, 1976), (Borrel, 1978), (Craig, 2005). Le formalisme de Denavit-Hartenberg est couramment rencontré dans le monde industriel et est celui qui a orienté ces travaux (Denavit and Hartenberg, 1955).

Dans un premier temps, des repères doivent être définis sur chaque pièce composant le robot suivant certaines règles.

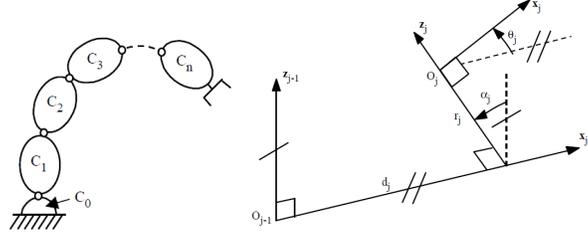


Figure 3: (a) Structure ouverte simple - (b) Paramètres géométriques

Une structure ouverte simple est composée de $n+1$ corps notés C_0, \dots, C_n et de n articulations. Le corps C_0 désigne la base du robot et le corps C_n le corps qui porte l'effecteur, dans notre cas la torche. L'articulation j connecte le corps C_j au corps C_{j-1} (Figure 3a). Le repère \mathbf{R}_j est attaché au corps C_j . Le passage du repère \mathbf{R}_{j-1} au repère \mathbf{R}_j est fonction de quatre paramètres géométriques (Figure 3b), tel que suit (Khalil and Dombre, 2002) :

- l'axe \mathbf{z}_j est confondu avec l'axe de l'articulation j
- l'axe \mathbf{x}_j , est l'axe perpendiculaire commun entre \mathbf{z}_j et \mathbf{z}_{j+1} . Si les axes \mathbf{z}_j et \mathbf{z}_{j+1} sont parallèles ou colinéaires, \mathbf{x}_j n'est pas unique. Son choix se fait par des considérations de symétrie ou de simplicité.
- α_j est l'angle entre les axes \mathbf{z}_{j-1} et \mathbf{z}_j
- d_j est la distance entre \mathbf{z}_{j-1} et \mathbf{z}_j suivant \mathbf{x}_{j-1}
- θ_j est l'angle entre les axes \mathbf{x}_{j-1} et \mathbf{x}_j
- r_j est la distance entre \mathbf{x}_{j-1} et \mathbf{x}_j suivant \mathbf{z}_j

En ce qui concerne le robot 6 axes, les repères de la Figure 4 sont ainsi obtenus.

En notant q_i la consigne de chacun des moteurs, les paramètres géométriques du Tableau 1 sont obtenus. Les valeurs indiquées sont les valeurs connues du robot.

La table rotative est constituée de deux liaisons pivots nominalement perpendiculaires (Figure 5).

Le repère \mathbf{R}_0 est le repère de base du robot. Le repère $\mathbf{R}_r(O_r, \mathbf{x}_r, \mathbf{y}_r, \mathbf{z}_r)$ est le repère de la table rotative. Un repère est associé à chaque pièce de la table suivant le formalisme de DH. Les paramètres de DH de la table rotative sont donnés dans le Tableau 2.

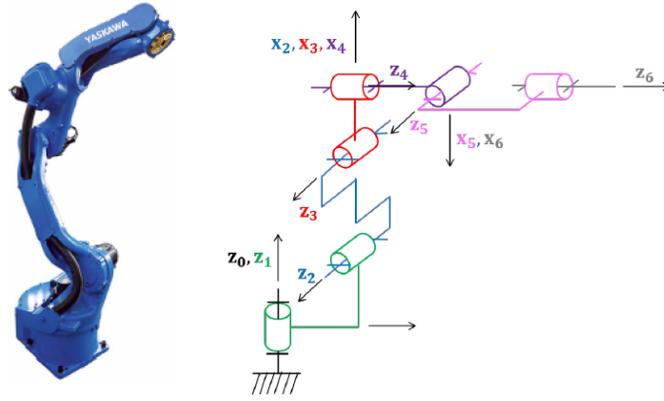


Figure 4: Modèle géométrique du robot

Tableau 1: Paramètres de Denavit-Hartenberg du robot

Articulation	σ_j	α_j	d_j	θ_j	r_j
1	0	0	0	$\theta_1 = q_1$	r_1
2	0	$\frac{\pi}{2}$	d_2	$\theta_2 = \frac{\pi}{2} + q_2$	0
3	0	0	d_3	$\theta_3 = q_3$	0
4	0	$\frac{\pi}{2}$	d_4	$\theta_4 = q_4$	r_4
5	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_5 = q_5$	0
6	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_6 = -q_6$	r_6

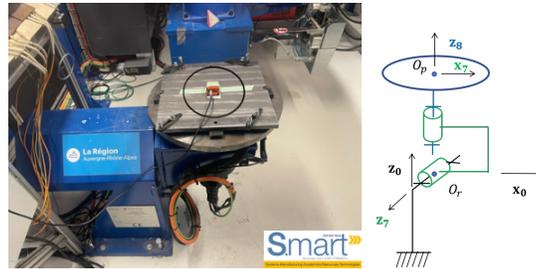


Figure 5: Placement des repères de la table rotative

À partir des paramètres de DH, le modèle géométrique du robot est défini par l'écriture des matrices de transformation homogène entre le repère \mathbf{R}_{j-1} et \mathbf{R}_j (Eq 1).

Tableau 2: Paramètres de Denavit-Hartenberg de la table rotative

Articulation	σ_j	α_j	d_j	θ_j	\mathbf{r}_j
7	0	$\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_7 = q_7$	0
8	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_8 = q_8$	r_8

$${}^{j-1}\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} \cos\theta_j & -\sin\theta_j & 0 & d_j \\ \cos\alpha_j \sin\theta_j & \cos\alpha_j \cos\theta_j & -\sin\alpha_j & -r_j \sin\alpha_j \\ \sin\alpha_j \sin\theta_j & \sin\alpha_j \cos\theta_j & \cos\alpha_j & r_j \cos\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Une dernière matrice de transformation homogène est ajoutée pour prendre en compte le fait que le point piloté (TCP) est à l'extrémité de la torche, noté ${}^6\mathbf{T}_e$ (Eq 2). Les valeurs des jauges de l'outil ont été réglées par le fabricant de la cellule et implémentées dans la commande numérique du robot. Cette matrice peut ainsi être déduite des informations disponibles dans la commande numérique. Ici, $J_{x\text{torche}} = 8,916$ mm, $J_{y\text{torche}} = 0,348$ mm, $J_{z\text{torche}} = 508,163$ mm.

$${}^6\mathbf{T}_e = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & J_{x\text{torche}} \\ 0 & 1 & 0 & J_{y\text{torche}} \\ 0 & 0 & 1 & J_{z\text{torche}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Un opérateur de transformation homogène est ajouté pour définir le décalage entre le centre du repère de base du robot O_0 et le centre du repère de base de la table (Eq 3).

$${}^0\mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_r \\ 0 & 1 & 0 & y_r \\ 0 & 0 & 1 & z_r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Un dernier opérateur de transformation homogène est défini pour prendre en compte le décalage entre le repère pièce \mathbf{R}_p et le repère du plateau \mathbf{R}_8 (Eq 4).

$${}^8\mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} I_x & I_y & I_z & x_p \\ J_x & J_y & J_z & y_p \\ K_x & K_y & K_z & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ces paramètres sont implémentés dans la commande numérique (Eq 5, Eq 6 et Eq 7) :

$$\mathbf{x}_p = \begin{bmatrix} I_x \\ J_x \\ K_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.99999 \\ -0.00013 \\ 0.00015 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_p = \begin{bmatrix} I_y \\ J_y \\ K_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00013 \\ 0.99999 \\ 0.00008 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{z}_p = \begin{bmatrix} I_z \\ J_z \\ K_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00014 \\ 0.00008 \\ 0.99999 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Le modèle géométrique direct de la cellule robotisée permettant de connaître la position de la torche dans le repère pièce est ainsi obtenu (Eq 5).

$${}^p\mathbf{T}_e = {}^p\mathbf{T}_8 {}^8\mathbf{T}_7 {}^7\mathbf{T}_r {}^r\mathbf{T}_0 {}^0\mathbf{T}_1 {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 {}^3\mathbf{T}_4 {}^4\mathbf{T}_5 {}^5\mathbf{T}_6 {}^6\mathbf{T}_e \quad (8)$$

2.1.2 Identification des paramètres

Une campagne d'essais a été menée afin d'identifier les paramètres géométriques définis précédemment. La procédure se fait en deux temps, dans un premier temps en considérant la position de la torche dans le repère du robot puis dans le repère de la table rotative. La démarche consiste à récupérer les positions x_i de l'effecteur dans la CN du robot associé aux mouvements articulaires indépendants de chaque moteur θ_i . Cette stratégie est identique à celle utilisée dans la stratégie "Circle Point Analysis" (CPA) (Cho et al., 2019).

Ces essais ont montré que les paramètres de DH implémenté dans la CN, sont les valeurs nominales du robot et de la table rotative (Tableau 3).

Tableau 3: Paramètres géométriques du robot et de la table rotative

paramètre identifié	Valeur nominale en mm
r_1	0
d_2	155
d_3	614
d_4	200
r_4	640
r_6	100
r_8	230
d_8	0

Ces essais ont aussi permis de déterminer les inconnues des opérateurs de transformation homogène entre \mathbf{R}_0 et \mathbf{R}_r , et entre \mathbf{R}_8 et \mathbf{R}_p , permettant de positionner le robot par rapport à la table rotative (Tableau 4).

La définition et l'identification du modèle géométrique permet enfin de définir le modèle cinématique de la cellule robotisée.

2.2 Modèle cinématique

L'enjeu est d'avoir la capacité d'estimer la vitesse de dépose de la matière sur la pièce pour aider à l'analyse de l'influence du robot sur les défauts produits sur la pièce.

L'objectif est ainsi de développer un modèle faisant le lien entre la vitesse de rotation de chacun des moteurs et la vitesse de la torche dans le repère pièce. Il faut ainsi déterminer dans un premier temps le rapport de réduction entre les moteurs et le mouvement d'un axe du robot avant de définir le modèle cinématique.

Tableau 4: Paramètres géométriques

paramètre identifié	Valeur identifiée en mm
x_r	997.581
y_r	-9.434
z_r	-583.737
x_p	0.137
y_p	0.044
z_p	45.953

2.2.1 détermination des rapports de réduction

La commande numérique permet de relever pendant 50 secondes au maximum avec un pas de 4 ms la vitesse de déplacement de chacun des moteurs de la cellule de fabrication additive.

Ainsi, La détermination du rapport de réduction (Tableau 5) de chacun des axes se fait en comparant la mesure de la vitesse angulaire stabilisée au niveau de la structure du robot lors du déplacement piloté d'un axe avec une centrale inertielle (MTI-200) avec la mesure de déplacement du moteur relevée avec la commande numérique.

Ces rapports de réduction permettent ainsi de connaître la vitesse de rotation de chacun des axes du robot en fonction de la vitesse de rotation des moteurs.

Tableau 5: Rapports de réduction

	Vitesse moteur en tr/min	Vitesse robot en deg/s	Rapport de réduction
axe 1	241.318	11.3	128.133
axe 2	190.1757	10.124	112.697
axe 3	237.156	11.429	124.502
axe 4	304.876	21.281	85.957
axe 5	616.220	42.872	86.240
axe 6	209.231	31.284	40.128
axe 7	100	5.135	116.845
axe 8	100	4	150

2.2.2 Modèle cinématique

La description des coordonnées opérationnelles en fonction des vitesses articulaires génère le modèle cinématique direct du robot. Il est noté :

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (9)$$

avec $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ la matrice jacobienne de dimension $(m \times n)$ du mécanisme. Cette matrice jacobienne est obtenue ici en dérivant le modèle géométrique.

Ainsi Le modèle cinématique direct permet d'estimer la vitesse de déplacement du TCP dans le repère pièce.

Afin de connaître la vitesse de dépose lors de la fabrication de la tulipe, la vitesse des moteurs a été enregistrée sur une portion de fabrication de la tulipe (Figure 6). Sur la Figure 6a, il est possible de constater que la vitesse atteint des pics de 300 cm/min. pour corrélérer la vitesse de dépose avec la trajectoire, il est représenté sur la Figure 6b, le parcours reconstruit de la torche en intégrant la vitesse. Les couleurs de la trajectoire permettent de faire le lien avec la vitesse.

Les couleurs des deux courbes représentent l'amplitude de la vitesse de dépose. Ainsi, Il est possible de constater que la torche décélère à l'entrée et à la sortie du changement brusque de direction et que le pic de vitesse se trouve au niveau du changement brusque.

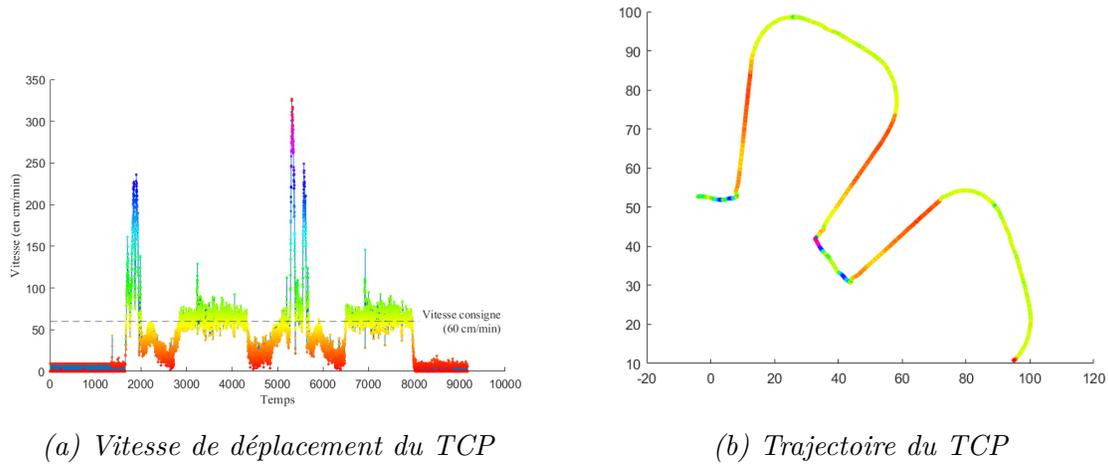


Figure 6: Vitesse et trajectoire du TCP dans le repère pièce

3 Conclusion

Les travaux menés ont permis d'estimer la vitesse de déplacement du TCP dans le repère pièce et de comprendre une partie des défauts géométriques de la pièce. Cette observation n'était pas triviale, car dans le domaine de l'usinage, le passage d'une discontinuité génère généralement un ralentissement au niveau de la trajectoire (Pateloup et al., 2004). Le fait que le TCP accélère montre que la gestion cinématique de la trajectoire sur la cellule robotisée de l'étude n'a pas forcément été adaptée aux problématiques de la fabrication additive.

Des travaux doivent maintenant être conduits pour proposer des pistes d'amélioration sur la gestion du passage de discontinuité. A partir de l'expérience menée, Il est possible de faire l'hypothèse que dans le choix actuel c'est la rotation de l'axe 8 qui pilote le

calcul des trajectoires des autres axes, ce qui peut expliquer leur forte sollicitation cinématique et les vitesses importantes induites au niveau du TCP lorsque l'axe 7 change brusquement de direction au niveau des discontinuités. Il est donc important de discuter l'impact de la méthode de gestion de la redondance sur le comportement cinématique de la cellule.

Il est aussi nécessaire de proposer une procédure d'identification du robot, de manière à qualifier si son comportement est compatible aux attentes de la fabrication additive.

Remerciement

Les travaux présentés dans cet article ont été financé par la Région Auvergne Rhône Alpes dans le cadre du projet CraFT.

Références

Borrel, P. (1978). Modèle de comportement de manipulateurs—application à l'analyse de leurs performances et à leur commande automatique thesis.

Cho, Y., Do, H. M., and Cheong, J. (2019). Screw based kinematic calibration method for robot manipulators with joint compliance using circular point analysis. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 60:63–76.

Craig, J. J. (2005). Introduction to robotics: mechanics and control. Pearson Educacion.

Denavit, J. and Hartenberg, R. S. (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices.

Fronius (2014). Cold Metal Transfer : The technology. CMT technology.

Jin, W., Zhang, C., Jin, S., Tian, Y., Wellmann, D., and Liu, W. (2020). Wire arc additive manufacturing of stainless steels: a review. Applied sciences, 10(5):1563.

Khalil, W. (1976). Modélisation et commande par ordinateur du manipulateur MA 23: extension à la conception par ordinateur des manipulateurs. PhD thesis, Université des Sciences et Techniques du Languedoc.

Khalil, W. and Dombre, E. (2002). Modeling identification and control of robots. CRC Press.

Pateloup, V., Duc, E., and Ray, P. (2004). Corner optimization for pocket machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(12-13):1343–1353.

Renaud, M. (1975). Contribution à l'étude de la modélisation et de la commande des systèmes mécaniques articulés. PhD thesis, Université Paul Sabatier.

Sheth, P. N. and Uicker Jr, J. (1971). A generalized symbolic notation for mechanisms.