

Laboratoire d'accueil : Laboratoire de Conception Fabrication Commande, EA 4495

Profil recherché : Master Robotique ou Mécatronique ou Automatique

Type de contrat : Contrat doctoral de l'école doctorale IAEM Lorraine

Rémunération : environ 21000 € brut par an

Lieu de travail : Metz

Plus d'informations : <http://lcf.ensam.eu/>

Contact : Gabriel Abba - gabriel.abba@univ-lorraine.fr . Chaque dossier de candidature devra comporter un CV, un relevé des résultats du 1^{er} semestre de Master et une lettre de motivation en relation avec le sujet. Date limite de candidature : 15 mai 2019.

Titre : Robotisation de la fabrication additive par procédé arc-fil : Identification et amélioration de la commande.

Directeur de thèse : Gabriel Abba, professeur, co-directeur : François Léonard, MCF

Contexte du travail :

La fabrication additive (FA) de pièces métalliques a fait l'objet d'un vif intérêt ces dernières années car elle constitue une solution technologique importante pour la réalisation de pièces complexes en rupture avec les procédés traditionnels par enlèvement de matières. Cette technologie présente un intérêt économique pour la fabrication de pièces i) ayant des contraintes de masse ce qui nécessitent des topologies optimisées difficiles à obtenir par usinage, ii) de grandes dimensions comme dans l'aéronautique, iii) prototypes ou fabriquées unitairement, iv) pour la maintenance sans avoir besoin de mettre en stock un grand nombre de référence v) avec l'ajout de fonctionnalité sur une pièce initiale obtenue par procédé traditionnel. Néanmoins le procédé, pour être compétitif, nécessite des cadences de production et donc des taux de dépôt importants et une technologie qui s'adapte facilement pour des formes complexes élaborées en CAO. La robotisation du procédé est de ce fait une solution très intéressante car elle permet d'accéder à des géométries de pièces complexes et à la réalisation de pièces de grandes dimensions.

Pour le dépôt de matières, les procédés les plus utilisés (SLS, SLM, EBM)¹ utilisent une poudre métallique. Ces procédés ont un certain nombre de points faibles : matériau d'apport onéreux, voire toxique pour certains métaux et taux de dépôt faible (quelques dizaines de cm³ à l'heure). Le procédé de soudage par fil et arc, WAAM² qui est envisagé dans ce travail, présente ainsi une alternative très intéressante. Ce procédé de soudage utilise une commande, généralement de type CMT³ qui apporte une meilleure stabilité de l'arc et réduit les énergies.

Les principaux avantages des robots industriels adaptés à la FA sont : i) leur coût est inférieur à d'autres machines ou solutions technologiques pour l'automatisation de processus de production, ii) les capacités robotiques se développent rapidement et couvrent de plus en plus de champ d'applications, iii) leur

¹ Selective Laser Sintering, Selective Laser Melting, Electron Beam Melting

² Wire Arc Additive Manufacturing

³ CMT pour Cold Metal Transfer

relative facilitée à être connecter à un système de planification de trajectoire (FAO) lui-même interfacé avec la CAO, iv) les robots ont des pièces mobiles de plus faible inertie que les machines-outils (MO), sont polyvalentes (6 degrés de liberté) et ont la capacité d'effectuer des tâches avec une bonne précision, v) les robots sont plus rapides que les MO et donc capables d'augmenter la productivité, et vi) la taille des robots peut être adaptée à la dimension et à l'environnement de travail.

Les robots présentent également des inconvénients : i) les robots ne sont pas aussi précis et rigides que les MO, ii) les robots présentent des fréquences vibratoires relativement basses ce qui peut détériorer la qualité de la production, et iii) les contrôleurs de robots n'ont pour l'heure pas tous les préprocesseurs adaptés à l'interfaçage directe avec les systèmes de CAO.

La production de soudure à forte épaisseur comme le soudage de pièces métalliques de fortes épaisseurs ainsi que la liaison entre pièces de forme gauche ou de raccord en té nécessitant une résistance importante rentre également dans le cadre de ce sujet.

Etat de l'art

Ce sujet se concentre sur la commande du procédé WAAM robotisé. Les principaux paramètres du contrôle du procédé de soudage sont la vitesse de déroulement du fil, la vitesse d'avance, les amplitudes et fréquences de balayage, la forme de la trajectoire de balayage et l'angle d'inclinaison de la torche. Un état de l'art assez détaillé est déjà disponible [1] ,[2] ,[3] ,[4] ,[5] ,[6] ,[7] . Le grand nombre de paramètres de commande nécessite que l'on fasse des choix et que l'on définisse les critères les plus adaptés (qualité des soudures, structures métallographiques, stabilité de l'arc et du bain de fusion, tolérances sur les formes et l'erreur géométrique des cordons, etc.

Toute adaptation d'un procédé de production nécessite des moyens de mesure. Dans le cas du procédé de soudage multi-passe, la mesure de la surface réalisée après une passe peut se faire par un appareil de scrutation 3D, puis analyser pour en extraire les caractéristiques et les défauts [6] ,[7] ,[8] ,[9] .

La seconde étape du procédé de fabrication consiste ensuite à planifier la passe suivante à l'aide d'outils d'analyse de défaut et de modèles prédictifs du procédé de dépôts afin de compenser au mieux les défauts et d'optimiser certains critères en particulier le taux de dépôt et la qualité de forme de la surface [11] ,[12] ,[13] . Ce processus est similaire à une commande d'un système discret (ici spatial) pour lequel il faut mettre au point une commande discrète avec un correcteur et une compensation prédictive. Plusieurs articles donnent déjà des pistes intéressantes [8] ,[13] ,[14] ,[15] .

La robotisation du procédé nécessite également une très bonne connaissance du comportement du robot. Le plus souvent, la dynamique du robot peut être négligée, par contre le positionnement cartésien doit être très précis. La production de pièces de grandes dimensions nécessitant des robots de grande envergure, l'action de la gravité, des jeux et les incertitudes du modèle géométrique jouent un rôle majeur. De nombreux travaux dans ce sens ont été réalisés, les références [16] ,[17] ,[18] ,[19] , [20] ,[25] [27] en constituent quelques exemples. Afin d'affiner encore la précision des commandes, des techniques de compensation utilisant des modèles de frottement en base vitesse et lors des changements de sens de la vitesse sont peut être également nécessaires [21] ,[22] ,[23] ,[24] ,[26] . D'autre part, les chercheurs du LCFC ont déjà utilisé ces modèles pour améliorer sensiblement la commande des robots manipulateurs.

Plan de réalisation (étapes clés et calendrier prévisionnel)

Étape 1 : identification du comportement du procédé de soudage

Les travaux à mener consistent principalement à rechercher l'influence de chaque grandeur de commande sur la forme et la qualité du cordon de soudure. Il faut également acquérir une estimation des constantes de temps qui interviennent dans le procédé.

Ces modèles et paramètres seront acquis suite à une série de tests effectués sur le robot ABB IRB 8700 muni d'une torche à souder disponible au laboratoire.

Cette étape sera conclue par une étude des possibilités de commande en fonction des entrées possibles sur le générateur de soudage ainsi que leur influence sur la qualité du cordon.

Étape 2 : étalonnage du robot : identification du modèle géométrique et de jeu

Les travaux consistent donc à identifier le modèle du robot, en particulier son positionnement cartésien, son modèle de raideur et les jeux dans les transmissions. Les méthodes d'étalonnage déjà bien éprouvées seront utilisées. L'acquisition des données de position se fera par capteur laser-tracker.

Étape 3 : modification du logiciel du contrôleur pour une interface de commande par ordinateur externe

Cette étape permet d'implanter dans le contrôleur les modèles obtenus précédemment à savoir le modèle géométrique complet du robot IRB 8700 ainsi que son modèle de raideur et les jeux. Lorsque les modifications ne sont pas possibles sur le contrôleur lui-même, les modèles seront mis en œuvre sur un ordinateur externe connecté à la commande du robot.

Étape 4 : extraction des caractéristiques de surface à partir d'une scrutation par caméra 3D

Les caractéristiques des surfaces après chaque passe seront extraites des images acquises sur un dispositif d'acquisition 3D par caméra stéréoscopique de grande précision disponible au laboratoire. Les tests permettront de replanifier en off-line la couche suivante de dépôts ainsi que les modifications temporelles à apporter à la commande du générateur de soudage. Ces modifications seront définies par un algorithme de compensation prédictif.

Étape 5 : étude, simulation et tests d'une nouvelle commande de dépôt multi-passe

Un simulateur est développé dans cette partie en intégrant le modèle du procédé et les modèles du robot identifiés précédemment. Ce simulateur permet de tester des nouvelles lois de commande en passe itérative implantées sur la commande du robot.

Cette étape est essentielle afin de déterminer les progrès en termes de performances. La cadence et la précision de contrôle en position seront les critères qui permettront de juger de la pertinence des lois de commande envisagées.

Étape 6 : rédaction du mémoire de thèse et rédactions de publications

Cette étape permet de rassembler dans un mémoire l'ensemble des acquis scientifiques et techniques obtenus puis de faire soutenir la thèse devant un jury de haute qualité.

Les étapes 1 à 6 comprennent également à chaque fois une partie d'étude bibliographique ainsi que du temps consacré à la rédaction d'articles ou de communications lorsque les résultats s'y-prêtent.

Bibliographie :

- [1] J. B. Song and D. E. Hardt, Dynamic modeling and adaptive control of the gas metal arc welding process, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 116, No. 3, pp. 405-413, 1994.
- [2] Y. Chen, Y. He, H. Chen, H. Zhang, S. Chen, Effect of weave frequency and amplitude on temperature field in weaving welding process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75, No.5-8, pp. 803-813, 2014.
- [3] H. C. Fang, S. K. Ong, A. Y. C. Nee, Adaptive pass planning and optimization for robotic welding of complex joints, *Advances in Manufacturing*, Vol. 5, No. 2, pp. 93-104, 2017.
- [4] L. J. Yang and R. S. Chandel, An analysis of curvilinear regression equations for modeling the submerged-arc welding process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, No. 1-4, 1993.
- [5] Z. Bingul, G.E. Cook, Dynamic modeling of GMAW process, *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*, Vol. 4, pp. 3059-3064, 1999.
- [6] Ye Feng, Song Yong Lun, Li Di, Lai Yi Zong, Application of support vector machines to quality monitoring in robotized arc welding, *Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN'02 (Cat. No.02CH37290)*, Vol. 3, pp. 2321-2326, 2002.
- [7] Jing Li, Yi Zhuang, Fang Li, Wei Zhu, XiongJian Liao, Min Zhang, A detailed design model based on trust chain for seam tracking system of gas metal arc welding, *The 2nd International Conference on Information Science and Engineering*, pp. 1-4, 2010.

- [8] S. Xia, C. K. Pang, A. Mamun, C. M. Chew, K. P. Tan, Feedforward compensation for suppression of seam boundary error propagation in robotic welding systems, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 23, No. 4, pp. 1919-1929, Aug 2018.
- [9] C. Yang, Z. Ye, Y. Chen, J. Zhong, and S. Chen, Multi-pass path planning for thick plate by DSAW based on vision sensor, *Sensor Review*, Vol. 34, No. 4, pp. 416-423, 2014.
- [10] H. S. Moon and R. J. Beattie, Development of adaptive fill control for multitorch multipass submerged arc welding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 19, No. 12, pp. 867-872, 2002.
- [11] Nathan Larkin, Andrew Short, Zengxi Pan, Stephen van Duin, Automatic Weld Path Generation for Mesh Objects, 2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), pp. 338-343, 2017.
- [12] Vahid OstadAliAkbari, Rasul Fesharakifard, Seyed Mehdi Rezaei, A mechatronic approach for real-time process control to achieve a uniform bead shape of robotic welding, 2017 5th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), pp. 426-431, 2017.
- [13] M. Yamamoto, Y. Kaneko, K. Fujii, T. Kumazawa, K. Ohshima, G. Alzamora, T. Kubota, F. Ozaki, S. Anzai, Adaptive control of pulsed MIG welding using image processing systems, *Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol.2, pp. 1381-1386, 1988.
- [14] L.J. Brown, S.P. Meyn, R.A. Weber, Adaptive dead-time compensation with application to a robotic welding system, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 6, N° 3, pp. 335-349, 1998.
- [15] Filippo Bonaccorso, Carlo Bruno, Luciano Cantelli, Domenico Longo, Giovanni Muscato, Salvatore Rapisarda, A feedback control system for a rapid production process based on robotic welding deposition, *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, pp. 1-6, 2010.
- [16] Genliang Chen ; Hao Wang ; Zhongqin Lin, Determination of the Identifiable Parameters in Robot Calibration Based on the POE Formula, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 30, N° 5, pp. 1066-1077, 2014.
- [17] L.J. Everett ; T.W. Ives, A sensor used for measurements in the calibration of production robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, N° 1, pp. 121-125, 1996.
- [18] Chris Lightcap ; Samuel Hamner ; Tony Schmitz ; Scott Banks, Improved Positioning Accuracy of the PA10-6CE Robot with Geometric and Flexibility Calibration, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, N° 2, pp. 452-456, 2008.
- [19] Brunot M., Janot A., Carrillo F., Gautier M., A Separable Prediction Error Method for Robot Identification, *2016 IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49, N° 21, pp. 487-492.
- [20] Komlan Kolegain, Francois Leonard, Sandra Zimmer, Amaryllis Ben Attar, Gabriel Abba, Off-line path programming for three-dimensional Robotic Friction Stir Welding based on Bézier curves, *Industrial Robot*, Vol. 45, N° 5, pp. 669-678.
- [21] Qin J., F. Leonard and G. Abba, Real-time trajectory compensation in robotic friction stir welding using state estimators, *IEEE Transactions on Control System Technologies*, Vol. 24, N° 6, pp. 2207-2214.
- [22] Bogdan I.C. and G. Abba, Identification of the servomechanism used for micro-displacement. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'09*, Oct. 11-15, 2009, Saint Louis, Missouri, cdRom paper N°513, pp. 1986-1991.
- [23] Bogdan I.C. and G. Abba, Identification of mechanical parameters at low velocities for a micropositioning stage using a velocity hysteresis model. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, St. Paul, Minnesota, May 14-18, 2012, Conf. proceedings, Article number6224720, pp. 430-435.
- [24] Qin J., F. Leonard and G. Abba, Non-linear Observer-based Control of Flexible-joint Manipulators Used in Machine Processing, *Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference On Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2012*, Nantes, France, July 2-4, 2012, Vol. 2, 2012, Pages 251-260.
- [25] Klimchik A., Y. Wu, G. Abba, S. Garnier, B. Furet and A. Pashkevich, Robust algorithm for calibration of robotic manipulator model, *The IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management and Control, MIM 2013*, June 19-21, 2013, Saint Petersburg, Russia, pp. 808-812.
- [26] Qin J., F. Leonard and G. Abba, Nonlinear discrete observer for flexibility compensation of industrial robots, *Proceedings of the 19th IFAC World Congress on International Federation of Automatic Control, IFAC 2014*; Cape Town; South Africa; 24-29 August 2014, Vol. 19, pp. 5598-5604.
- [27] Jubien A., G. Abba and M. Gautier, Joint stiffness identification of a heavy kuka robot with a low-cost clamped end-effector procedure, *Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, ICINCO 2014*; Vienna; Austria; 1-3 September 2014, Vol. 2, pp. 585-591.