

AMELIORATION DE LA PRECISION DE DEPOSE DES FIBRES ROBOTISEE

Uhart Maylis

Mél : Maylis.Uhart@irccyn.ec-nantes.fr

Résumé : Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans le domaine exigeant de l'aéronautique. Pour répondre à ce besoin grandissant, Coriolis Composites a développé une solution de placement de fibres robotisé appelé PFR en utilisant un bras manipulateur série composé de six axes. Cette tâche nécessitant un effort de compactage de la matière plus ou moins important suivant le matériau utilisé. Le robot est donc amené à maintenir le contact avec l'objet en fabrication et exercer ainsi une force modulée. Le robot n'étant pas fait pour travailler en effort, des problèmes de précision apparaissent. Dans ce cadre là, le projet industriel IMPALA a vu le jour afin d'optimiser ce nouveau procédé. Cet article présente l'utilisation d'une commande hybride position/force afin de maîtriser l'effort de compactage dans un premier temps puis d'améliorer la précision de dépose des fibres par ajout de capteurs extéroceptifs.

Mots clés : *Placement de Fibres Robotisé, Précision, Commande hybride position/force.*

Collaborations : Projet industriel IMPALA (Innovation Matériaux et Procédés avec plAcement de fibres LAser) incluant Ecole Centrale Nantes, ESTIA Recherche, CompositAdour, Coriolis Composites, Dassault Aviation, Daher-Socata et Composite Aquitaine.

1 Introduction

Des travaux de recherche ont été réalisés sur le placement de fibres pour utiliser des robots [1]. Ce papier présente le travail mené dans le cadre du projet IMPALA, géré par l'entreprise Coriolis Composites, qui a développé une solution de placement de fibres robotisé.

La cellule robotisée est composée d'un robot KUKA KRC240 (6 axes), un rail de 16 mètres (1 axe), un système de positionnement horizontal (1 axe) et une surface de drapage sur une table aspirante. Huit axes doivent donc être synchronisés. Le système de chauffe peut être soit une lampe infra-rouge soit un laser à diode à émission continue d'une puissance maximale de 12 kW. Le moyen de chauffe est choisi en fonction du matériau et des températures à atteindre.

Le projet IMPALA a pour objectif d'améliorer à l'aide d'études théoriques et de valider par la réalisation de démonstrateurs les solutions déjà proposées par Coriolis Composites. Un des objectifs est d'améliorer la précision de dépose des fibres robotisée.

Ce papier décrit le procédé de Placement de Fibres Robotisé dans la section 2 puis sa modélisation dans la section 3. La section 4 décrit la commande référencée capteur implémentée dans la section 5. La conclusion et les perspectives sont présentées dans la section 6.

2 Contexte industriel

2.1 Description du système actuel

Les logiciels développés par Coriolis Composites nécessitent la CAO de la pièce afin de générer les plis de carbone suivant les différentes orientations, puis les bandes et enfin les trajectoires théoriques de la tête de dépose. Le procédé nécessite un effort de compactage important pouvant aller jusqu'à 1500 N. Pour cela, la tête est munie d'un vérin pneumatique en amont du rouleau de compactage. Cette force doit être normale à la surface entraînant une orientation de la tête contrainte. La figure 1 décrit cet effort de compactage. Lorsque l'outil est positionné, le vérin est commandé en position afin de générer l'effort. Il s'agit d'une commande en boucle ouverte, il n'y a pas de lien direct entre la commande en position et la commande en effort.

2.2 Observations

Avec cette implémentation, des problèmes de précision de placement des fibres peuvent apparaître entraînant une qualité de pièces insuffisantes pour certains domaines comme l'aéronautique. Les défauts observés sont des espacements ou des chevauchements entre les bandes causés par un placement des fibres différent entre les trajectoires théoriques et les trajectoires réelles. Ceci entraîne une limitation de la vitesse de la dépose et une gestion complexe du système de chauffe.

3 Proposition

3.1 Modélisation de la tâche

La tâche de placement de fibres nécessite une dualité de commande entre l'effort et la position mais aussi entre le moment et l'orientation (figure 1-a). Lors d'une première approche, on considère le rouleau de compactage non déformable et un roulement sans glissement. On commande donc le robot uniquement en effort ou en position. La direction suivant l'axe x doit être commandée en position \mathbf{P}_x (définition de la trajectoire) et en moment \mathbf{T}_x (distribution de l'effort sur la surface). La direction suivant l'axe y doit être commandée en position \mathbf{P}_y (définition de la trajectoire) et en orientation \mathbf{O}_y (tête normale à la surface). La direction suivant l'axe z doit être commandée en effort \mathbf{F}_z (effort de compactage) et en orientation \mathbf{O}_z (définition de la trajectoire).

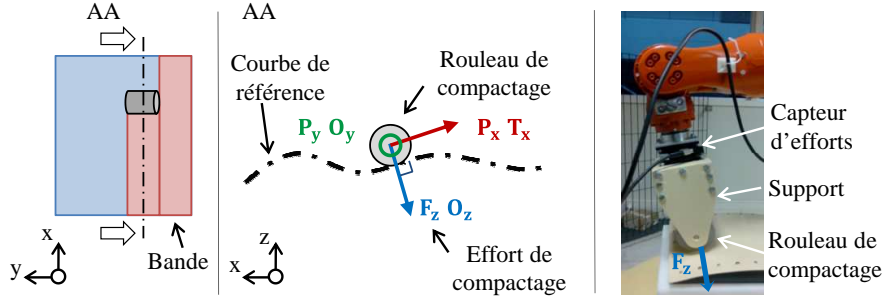


FIGURE 1 – (a) Dualité de commande : effort $\mathbf{F}_{\text{axe}-i}$ vs position $\mathbf{P}_{\text{axe}-i}$, moment $\mathbf{T}_{\text{axe}-i}$ vs orientation $\mathbf{O}_{\text{axe}-i}$ - (b) Cellule ESTIA

3.2 Modélisation du robot

Le modèle dynamique classique d'un robot manipulateur peut être écrit sous la forme de Lagrange [2] :

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (1)$$

\mathbf{q} est le vecteur des positions articulaires. $\mathbf{\Gamma}$ est le vecteur des couples/forces des actionneurs. $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ est la matrice d'inertie du robot définie positive. $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ est la matrice représentant les couples/forces de Coriolis et des forces centrifuges. $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ est le vecteur des couples/forces de gravité. Ce modèle est valide lorsque le robot est considéré sans effort extérieur autre que la gravité. Or, le robot de placement de fibres est en contact avec une surface rigide. Il y a une interaction entre la pièce et le rouleau de compactage. Par conséquent, il faut tenir compte de cette interaction en ajoutant les efforts extérieurs $\mathbf{J}^t \mathbf{F}_{\text{ext}}$ où \mathbf{J} est la matrice jacobienne de l'effecteur exprimée dans le repère de référence R_0 appelé repère atelier.

$$\mathbf{\Gamma} + \mathbf{J}^t \mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (2)$$

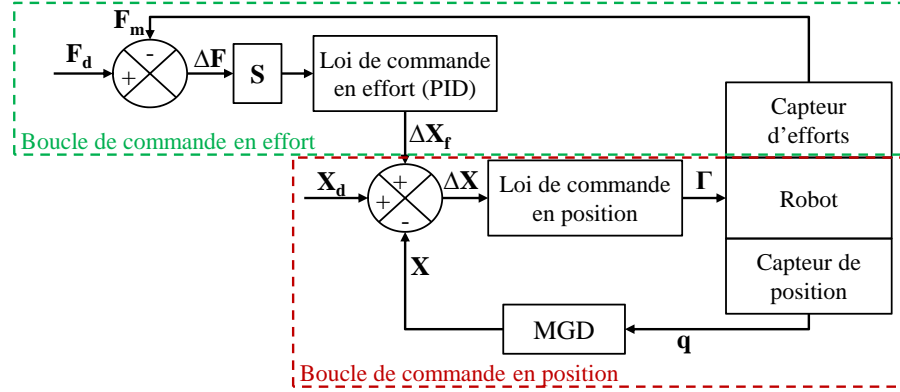
4 Commande référencée capteur

4.1 Capteur d'efforts

L'effort de compactage \mathbf{F}_z et le moment autour de l'axe x \mathbf{T}_x doivent être contrôlés. Nous utilisons donc un capteur d'efforts ATI à six degrés de liberté, fixé sur le poignet du robot entre la tête de dépose et le bras manipulateur (figure 1-b). Il mesure les efforts et les moments suivant les axes x, y et z.

4.2 Commande hybride externe

Parce que nous travaillons dans le cadre d'une application industrielle, la boucle de commande en position du contrôleur est inaccessible pour des questions de garantie. Par conséquent, il est nécessaire d'ajouter une boucle externe pour permettre un asservissement en effort. Celle-ci convertit le delta de l'effort voulu $\Delta \mathbf{F}$ en delta de position $\Delta \mathbf{X}_f$ pour la boucle interne via la loi de commande en effort (figure 2). La dualité de commande est gérée dans l'espace cartésien. Ainsi, les trajectoires théoriques peuvent être suivies tout en appliquant un effort de compactage \mathbf{F}_z [3] et un moment nul \mathbf{T}_x . La matrice de sélection diagonale \mathbf{S} permet de choisir les directions commandées en effort (terme $s_i = 0$) et les directions commandées en position (terme $s_i = 1$) telle que $\mathbf{S} = \text{Diag}(s_1, s_2, \dots, s_6)$.



\mathbf{F}_d : Efforts-moments désirés ; \mathbf{F}_m : Efforts-moments mesurés ; $\Delta \mathbf{F} = \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_m$; \mathbf{S} : Matrice de sélection pour commander \mathbf{F}_z et \mathbf{T}_x ; $\Delta \mathbf{X}_f$: Delta de position-orientation à effectuer ; \mathbf{X}_d : Position-orientation désirée ; \mathbf{X} : Position-orientation de l'effecteur dans l'atelier ; $\Delta \mathbf{X} = \mathbf{X}_d + \Delta \mathbf{X}_f - \mathbf{X}$; \mathbf{q} : Articulations du robot ; $\mathbf{\Gamma}$: Couples des actionneurs.

FIGURE 2 – Principe de la loi de commande hybride externe

5 Expérimentations

5.1 Environnement de tests

Pour réaliser les tests préliminaires, la cellule robotisée de l'ESTIA est utilisée (figure 1-b). Il s'agit d'un robot KUKA KR6 (6 axes) muni d'un module RSI (Robot Sensor Interface) permettant l'intégration de capteurs. Ce robot a la même cinématique que le robot KRC240. Seuls les paramètres dimensionnels et inertiels diffèrent. Un rouleau de compactage et son support ont été ajouté au système. Une communication de type client-serveur a été développée entre les différents éléments. Ainsi, le client "robot" communique avec le client "capteur d'efforts" à l'aide du serveur via une communication TCP/IP. Avec une période d'acquisition de 12 ms, les positions du robot et les efforts mesurés par le capteur sont enregistrés dans un fichier afin de les visualiser avec Matlab.

5.2 Procédures de tests

Commande en position : L'effort de compactage est obtenu par modification du point de contact qui est défini sous la surface du moule (figure 3). L'effecteur descend sur le moule jusqu'à obtenir $F_z = 8 \text{ N}$ (A→B). Ensuite, le robot est commandé en position pour qu'il se déplace de 150 mm suivant l'axe x uniquement puisque le moule est considéré comme plan (B→C). Enfin, l'effecteur est relevé manuellement (C→D). L'observation des efforts et des moments par rapport aux positions et aux orientations de l'effecteur permet d'établir un lien entre la position de l'effecteur sur le moule et les efforts résultants.

Commande hybride position/force : L'effort de compactage est commandé en boucle fermée. La procédure pour les passages (A→B) et (C→D) ne changent pas. Concernant le passage (B→C), le robot est commandé en position pour qu'il se déplace de 150 mm suivant l'axe x et commandé en effort suivant l'axe z afin d'avoir $F_z = 8 \text{ N}$ tout au long de l'avance. Pour cela, un correcteur PID est ajouté.

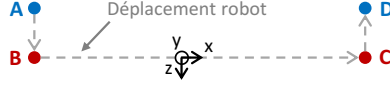


FIGURE 3 – Déplacement du robot

5.3 Résultats

L'analyse des résultats (figure 4) permet une étude qualitative de l'ajout de la commande en effort suivant la direction du compactage. L'idée est d'étudier la relation entre le contrôle en effort et la précision du placement de fibres. L'étude se fait entre les points B et C de la figure 3.

Dans le premier cas, lors du déplacement suivant l'axe x , l'outil varie très faiblement suivant l'axe z et il perd le contact avec le moule qui est considéré comme plan : l'effort passe de -8 N à 0 N. La mesure de l'effort est négative car le capteur mesure l'interaction du moule sur l'outil et non l'interaction de l'outil sur le moule. Dans le deuxième cas, l'outil corrige sa position suivant l'axe z afin de maintenir l'effort de compactage demandé. L'effort mesuré suivant l'axe z varie très rapidement en fonction de la position de l'outil. En effet, l'outil a besoin de descendre d'environ 0,5 mm suivant l'axe z pour pouvoir maintenir un effort de -8 N.

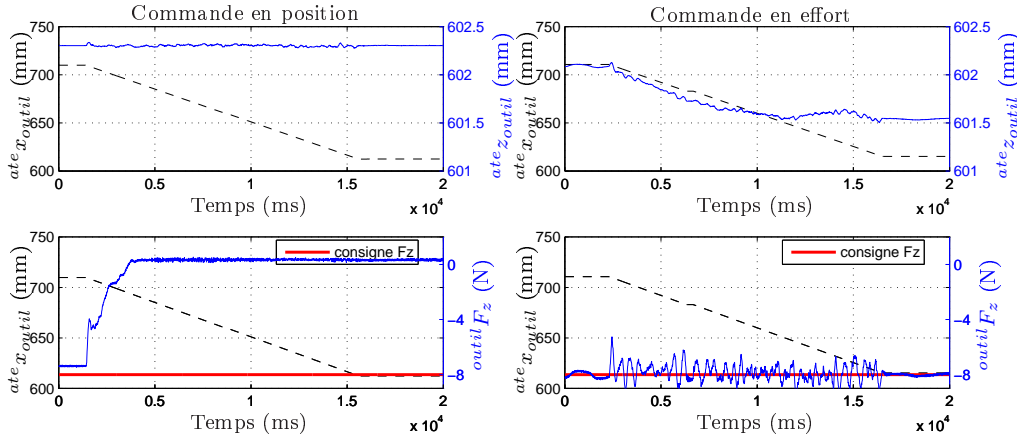


FIGURE 4 – Comparaison de la commande en position et de la commande en effort

6 Conclusion et perspectives

Pour commander l'effort de compactage, nous avons implémenté une commande hybride externe. Dans un premier temps, ceci nous permet de comprendre l'origine des défauts de précision. Le réglage du PID doit être amélioré afin d'avoir une meilleure réactivité du système. Pour caractériser le respect du positionnement des bandes, l'utilisation de capteurs extéroceptifs telle qu'une caméra est envisagée comme un outil de validation de l'amélioration de la qualité du drapage.

Références

- [1] N.J.Johnston, H.L.Belvin, R.J.Cano, J.M.Marchello, and A.B.Hulcher. "A prototype research laboratory for automated fabrication of high performance composites". In *Proceedings of ICCM 12*, Paris, France, 1999.
- [2] Dung Le Tien, Kang Hee-Jun, and Ro Young-Shick. "Robot manipulator modeling in Matlab-SimMechanics with PD control and online gravity compensation". In *International Forum on Strategic Technology 2010*, pages 446–449. IEEE, October 2010.
- [3] E. Degoulange, P. Dauchez, and F. Pierrot. "Determination of a force control law for an industrial robot in contact with a rigid environment". In *Proceedings of IEEE Systems Man and Cybernetics Conference - SMC*, pages 270–275, Le Touquet, France, 1993. IEEE.