



HAL
open science

Trajectoire de numérisation pour mesure On-Machine sur MOCN 5 axes

Nguyen Duy Minh Phan, Yann Quinsat, Claire Lartigue

► **To cite this version:**

Nguyen Duy Minh Phan, Yann Quinsat, Claire Lartigue. Trajectoire de numérisation pour mesure On-Machine sur MOCN 5 axes. 16ème colloque national – S-mart, Apr 2019, Karellis, France. hal-02093360

HAL Id: hal-02093360

<https://hal.science/hal-02093360>

Submitted on 8 Apr 2019

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.

Trajectoire de numérisation pour mesure *On-Machine* sur MOCN 5 axes

Nguyen Duy Minh Phan

LURPA, ENS Paris-Saclay, Univ. Paris-Sud, Université
Paris-Saclay, 61 avenue du Président Wilson
94235 Cachan- France
nguyen-duy-minh.phan@ens-paris-saclay.fr

Claire Lartigue

LURPA, ENS Paris-Saclay, Univ. Paris-Sud, Université
Paris-Saclay, 61 avenue du Président Wilson
94235 Cachan- France
claire.lartigue@ens-paris-saclay.fr

Yann Quinsat,

LURPA, ENS Paris-Saclay, Univ. Paris-Sud, Université
Paris-Saclay, 61 avenue du Président Wilson
94235 Cachan- France
yann.quinsat@ens-paris-saclay.fr

Résumé : *L'objectif des travaux présentés est de proposer une méthode de planification de trajectoire de numérisation pour la mesure on-machine (On-machine Measurement- OMM) dans une machine-outil 5 axes. Compte tenu des 5 degrés de liberté et de la rotation de la broche, il est possible d'améliorer l'accessibilité du capteur. Le capteur laser-plan positionné dans la broche permet de réduire le temps de mesure ; permettant ainsi une prise de décision rapide concernant la conformité géométrique de la pièce fabriquée et les corrections d'usinage potentielles. La planification de trajectoire de numérisation est basée sur le contrôle du recouvrement entre deux passes consécutives en gérant les orientations et le taux de couverture du faisceau laser. Par conséquent, la qualité et le temps de numérisation peuvent être contrôlés en optimisant les zones de recouvrement. Cette méthode est une adaptation pour une machine-outil à 5 axes résultant d'une méthode précédente développée pour un robot à 6 axes.*

Mots-clés— *Mesure on-machine, Capteur laser plan, Recouvrement, Machine-outil 5 axes, Numérisation*

I. INTRODUCTION

La mesure on-machine (On-Machine Measurement-OMM) est une catégorie des opérations de mesure pour laquelle la machine-outil est le système de déplacement (ou porteur) assurant les déplacements du capteur. Lors de la mesure on-machine, la mesure de la géométrie de la pièce est effectuée lorsque le processus d'usinage est arrêté sans démonter la pièce. La comparaison de la pièce usinée à son modèle CAO est ainsi facilitée et une prise de décision rapide pour des actions correctives, relativement à la conformité géométrique et dimensionnelle de la pièce réalisée, est possible. Dans le cadre de la mesure on-machine, les palpeurs à contact sont les plus anciennement et couramment utilisés. Ils permettent d'utiliser la machine-outil comme une machine MMT [1] lorsque les incertitudes de mesure dans la machine-outil sont bien identifiées [2]. Malgré l'évolution des systèmes de mesure sans

contact qui permettent un bon compromis entre vitesse d'acquisition et qualité de mesure, il y a peu de travaux sur leur utilisation dans le contexte OMM pour les machines-outils multiaxes. Nishikawa et al. [4] proposent d'utiliser un capteur laser dans une machine multiaxe afin de mesurer la section de pale d'une turbine. Les résultats de mesure de ce système sont très similaires avec les résultats obtenus sur une MMT. Ibaraki et al., [5] utilisent un capteur identique pour mesurer différents profils sur une pièce axisymétrique ; ils proposent un modèle cinématique de la machine afin de corriger les contributions des différentes erreurs sur la mesure. Afin d'augmenter la quantité de données acquises et de réduire le temps de mesure, les capteurs laser plan sont intéressants car leurs caractéristiques dimensionnelles simplifient leur intégration sur des machines-outils. La littérature ne propose pas travaux relatifs à l'utilisation d'un tel capteur dans un contexte de la mesure on-machine 5 axes. Les seuls travaux existant ne concernent que des trajectoire 3 axes. Quinsat et al., [6] utilisent en effet un tel capteur suite à une phase de détection de défauts afin de les quantifier.

L'un des verrous pour l'utilisation d'un tel capteur pour une application OMM concerne la stratégie de planification de trajectoire, c'est-à-dire la génération d'un ensemble de configurations du capteur (positions et orientations), définissant la trajectoire qui réponde aux contraintes de numérisation classiques, et qui soit cohérente avec le format de description d'une trajectoire d'outil pour usinage (Figure 1). Les contraintes de numérisation classiques, largement étudiées dans le contexte de génération de trajectoire sur MMT, sont liées à des critères de visibilité et de qualité [7, 8, 9]. En prenant la place de l'outil dans une machine-outil à 5 axes, le capteur a une plus grande accessibilité grâce aux différents mouvements possibles : 5 degrés de liberté (ddl) plus la rotation de la broche. La trajectoire du capteur correspond alors à la succession de

positions et d'orientations (C_E ; V_L ; V_C). Le point piloté C_E positionne la ligne laser de numérisation dans le champ de vision, et le couple de vecteurs (V_L ; V_C) oriente le capteur, avec V_L le vecteur directeur de la ligne laser, et V_C le vecteur directeur de l'axe de la source lumineuse.

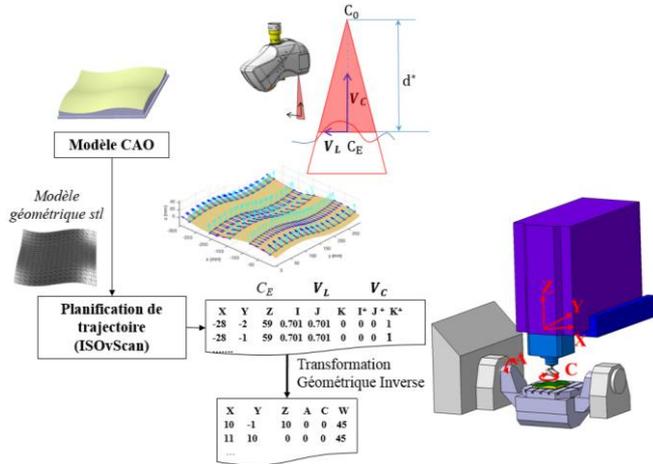


Figure 1. PARAMETRES DEFINISSANT LA TRAJECTOIRE DU CAPTEUR POUR LA MESURE ON-MACHINE

La stratégie de planification de trajectoire consiste à trouver la trajectoire du point piloté C_E , ainsi que l'évolution continue des orientations du capteur définies par le couple (V_L ; V_C) permettant la numérisation de la pièce. Bien que ce problème n'ait pas encore été abordé dans la littérature, certains travaux proposent des méthodes de planification de trajectoire pour capteur laser dédiées à l'inspection de pièces avec des robots industriels [10, 11, 12]. La plupart de ces méthodes reposent sur des critères de visibilité et de qualité.

Dans cet article, nous proposons une méthode de génération de trajectoire de capteur adaptée à la mesure on-machine avec une machine-outil à 5 axes. Dans des travaux précédents, nous avons développé une méthode de planification de trajectoire de numérisation sur des robots industriels, qui intègre le contrôle du recouvrement en tant que critère de qualité autre que le bruit de mesure [13]. Cette approche génère une trajectoire de numérisation dédiée à une structure à 6 ddl qui doit être adaptée à une machine-outil à 5 axes. En effet, la trajectoire exprimée dans le cadre de la pièce sous forme d'un ensemble de coordonnées ($X, Y, Z, I, J, K, I^*, J^*, K^*$) des configurations (C_E ; V_L ; V_C) s'exprime dans le repère de la machine-outil grâce à la Transformation Géométrique Inverse (TGI) (Figure 1). Dans le cas d'une machine-outil RRTTT, la TGI conduit à définir les coordonnées articulaires ($X; Y; Z; A; C; W$) dans l'espace articulaire où A et C sont les angles classiques (A : angle de rotation du berceau, C : angle de rotation du plateau), et où W permet l'indexation de la broche. La principale difficulté que nous pouvons souligner ici est que l'indexation de la broche pour la plupart des machines-outils avec un directeur de commande industriel ne peut pas être contrôlée en continu entre deux configurations de capteur. Il est donc nécessaire de fixer l'indexation de la broche à une valeur constante W_{cst} pour toutes les configurations du capteur. La trajectoire initiale donc doit être modifiée. Mais cette modification ne pourra pas être réalisée qu'en respectant l'ensemble des critères de qualité et de performance utilisés par la méthode ISOvScan. Ainsi, nous

proposons de modifier la trajectoire avec la priorité donnée au temps de mesure, par le contrôle du recouvrement entre deux trajets consécutifs.

Cet article est organisé comme suit : la méthode de planification de trajectoire de numérisation est brièvement présentée à la section 2 et est suivie à la section 3 par la méthode d'adaptation de la trajectoire de numérisation pour une machine-outil 5 axes. Enfin, la section 4 est dédiée à une application utilisant un système de numérisation constitué d'un capteur laser-plan monté sur une machine-outil 5 axes.

II. METHODE DE PLANIFICATION DE TRAJECTOIRE- ISOVSCAN

L'originalité de la méthode proposée est le contrôle de la qualité de numérisation en minimisant le temps de mesure, grâce au contrôle du recouvrement. Dans un travail précédent, l'importance du recouvrement sur la qualité de numérisation a été discutée [13], ce qui nous a conduit à développer la méthode de planification de trajectoire Iso-Overlap (ISOvScan). ISOvScan est basée sur la mise à plat de la surface maillée 3D, représentant la surface à mesurer, sur une surface paramétrique 2D par la méthode LSCM (Least-Squares Conformal Maps [14]). Les n facettes triangulaires T_j de la surface 3D sont transformées en n facettes t_j dans l'espace 2D. Des trajectoires équidistantes, chacune définie par un ensemble de points pilotés, sont générées dans l'espace 2D, puis transformées dans l'espace 3D par la LSCM inverse. Pour chaque point piloté, les orientations du capteur sont finalement calculées pour satisfaire les contraintes de qualité. Les différentes étapes de la méthode ISOvScan sont brièvement détaillées ci-après.

A. Génération des points pilotés

La trajectoire de numérisation est générée en 2D en s'inspirant d'un mode classique de génération par plans parallèles. La longueur du rectangle qui délimite la surface 2D définit la direction du plan, et les points pilotés sont déterminés par l'intersection entre les plans parallèles et la surface paramétrique. Pour contrôler le recouvrement, les plans parallèles sont équidistants, avec I_{2D} la distance entre deux plans parallèles correspondant à la distance entre deux passes successives dans l'espace 2D (Figure 2). Cependant, c'est la distance I_{3D} entre deux passes dans l'espace 3D qui contrôle le recouvrement. Par conséquent, une relation entre I_{2D} et I_{3D} est établie en considérant que le rapport des deux valeurs est égal au coefficient de proportionnalité des triangles similaires T_j et t_j où A_{T_j} et a_{t_j} sont les aires de la facette, respectivement, T_j et t_j :

$$\frac{I_{3D}}{I_{2D}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{A_{T_j}}{a_{t_j}}}$$

Chaque point piloté c_{ei} est ensuite transformé en son point correspondant C_{Ei} par la transformation inverse. Une fois que tous les points pilotés sont calculés, l'étape suivante consiste à déterminer les orientations du capteur en chacun d'eux.

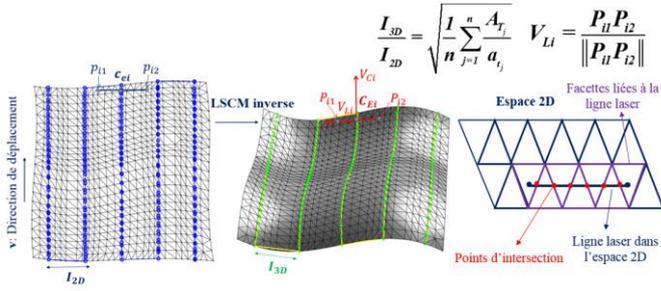


Figure 2. CALCUL DE TRAJECTOIRE DE NUMERISATION

B. Détermination des orientations du capteur

Les orientations du capteur sont déterminées en deux étapes. Le vecteur de la ligne laser V_L est déterminé avant la détermination du vecteur d'axe du faisceau laser V_C du capteur laser plan. Une distance de numérisation constante d_{opt} est d'abord imposée pour tous les points pilotés afin de garantir que la surface mesurée au point piloté appartient au champ de vision du capteur et d'assurer également la qualité de numérisation attendue, définie en fonction de la qualification du capteur [15]. Dans ce protocole de qualification du capteur, le bruit de numérisation est évalué pour différentes distances de numérisation. La distance de numérisation d_{opt} choisie correspond à une distance assurant le bruit de numérisation inférieur un seuil de bruit δ_{ad} pour la qualité.

La largeur de la ligne laser du capteur notée L_{opt} correspondant à cette distance de numérisation est constante par rapport à la surface balayée. Afin de maximiser la surface balayée, la ligne laser doit être perpendiculaire à la direction de déplacement des points pilotés de la trajectoire dans l'espace 3D. Pour cela, la ligne laser doit également être perpendiculaire à la direction de déplacement de la trajectoire dans l'espace 2D, notée v (Figure 2). La largeur de ligne laser l_{opt} dans l'espace 2D est définie en utilisant le coefficient de proportionnalité : $l_{opt} = L_{opt} \cdot (I_{3D}/I_{2D})$. Au chaque point c_{ei} , la ligne laser est positionnée perpendiculairement à la trajectoire et centrée sur c_{ei} . La largeur l_{opt} définit deux points à l'extrémité p_{i1} et p_{i2} de la ligne laser. Les coordonnées de points correspondants P_{i1} et P_{i2} de la ligne laser dans l'espace 3D à partir de points p_{i1} , p_{i2} dans l'espace 2D sont calculées grâce à la transformation LSCM inverse. Ensuite, le vecteur de la ligne laser V_{Li} au point piloté C_{Ei} est obtenu à partir des coordonnées de P_{i1} et P_{i2} .

Le vecteur de l'axe du faisceau laser V_C est déterminé afin que la direction de numérisation soit toujours perpendiculaire à la surface. Nous devons donc calculer le vecteur normal local à la surface à chaque point piloté C_{Ei} . Celui-ci est calculé comme la valeur moyenne de tous les vecteurs normaux aux facettes liées à la ligne laser au point C_{Ei} . Finalement, le vecteur directeur d'axe du faisceau laser est défini en chaque point piloté par : $V_{Ci} = n_{C_{Ei}}$.

Toute la trajectoire est ainsi obtenue avec un ensemble de positions et d'orientations (C_{Ei} ; V_{Li} ; V_{Ci}). La méthode de génération de trajectoire de numérisation avec le contrôle du recouvrement ISOvScan est implémentée sous Matlab©. Cette trajectoire de numérisation est évaluée par un simulateur

préalablement développé [16] qui repose sur l'analyse des configurations du capteur par rapport à la surface maillée. Dans ce simulateur, nous considérons que la valeur de bruit de numérisation δ_{ad} est un seuil pour la qualité de numérisation. Si le bruit est inférieur ce seuil, la couleur de facette est verte. Comme prévu, la zone verte représente la zone de non-recouvrement avec une bonne qualité de numérisation tandis que la zone jaune représente la zone de recouvrement (Figure 3).

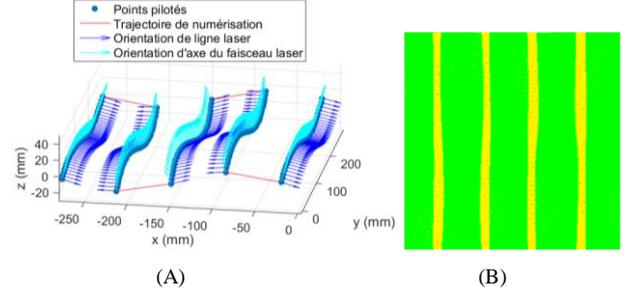


Figure 3. (A) TRAJECTOIRE DE NUMERISATION GENEREE PAR ISOVSCAN (B) SIMULATION DE NUMERISATION

III. ADAPTATION DE LA TRAJECTOIRE DE NUMERISATION A LA NUMERISATION SUR MACHINE 5 AXES

Pour exécuter la mesure dans la machine-outil 5-axes, la trajectoire (C_{Ei} ; V_{Li} ; V_{Ci}) exprimée dans le repère de la pièce sous la forme d'un ensemble de coordonnées (X_{pr} , Y_{pr} , Z_{pr} , I , J , K , I^* , J^* , K^*) doit être exprimée dans le repère de la machine-outil. Cette transformation est réalisée grâce à la Transformation Géométrique Inverse (TGI).

Les valeurs des angles A et C sont déterminées à partir du vecteur directeur de l'axe de faisceau de lumière V_C (I^* , J^* , K^*) dans l'équation (1) où la matrice M est la matrice de transformation cinématique du repère capteur au repère pièce (cf. annexe) :

$$\begin{bmatrix} I^* \\ J^* \\ K^* \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_{pr}, x_{pr}, y_{pr}, z_{pr})} = M \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_c, x_c, y_c, z_c)}, \begin{cases} I^* = \sin(C) \cdot \sin(A) \\ J^* = -\cos(C) \cdot \sin(A) \\ K^* = \cos(A) \end{cases} \quad (1)$$

La valeur de l'angle W est déterminée à partir V_L (I , J , K) et les angles A, C :

$$\begin{bmatrix} I \\ J \\ K \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_{pr}, x_{pr}, y_{pr}, z_{pr})} = M \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{(O_c, x_c, y_c, z_c)} \begin{cases} I = \cos(C) \cdot \cos(W) - \cos(A) \cdot \sin(C) \cdot \sin(W) \\ J = \sin(C) \cdot \cos(W) + \cos(A) \cdot \cos(C) \cdot \sin(W) \\ K = \sin(A) \sin(W) \end{cases} \quad (2)$$

Comme mentionné précédemment, l'indexation de la broche ne peut pas être contrôlée en continu entre deux configurations de capteur successives. La trajectoire du capteur doit être transformée en (X_m , Y_m , Z_m , A, C, W_{cst}) où W_{cst} représente une valeur constante de l'indexation de la broche pour toutes les

configurations du capteur. La valeur de W_{cst} est définie comme un angle entre la ligne laser du capteur et l'axe X dans le repère de la machine. W_{cst} est choisi pour que la variation de l'angle de la rotation du berceau selon l'axe A soit minimal. Ce critère vise à diminuer le risque de collision entre le capteur et le plateau lors de l'exécution de la mesure. À partir l'équation (2) $\sin(A) = K/\sin(W)$, il est facile de se rendre compte que la variation de l'angle A est minimum dans le cas $W_{cst} = 90^\circ$ ($\sin(W_{cst}) = 1$). L'adaptation de la trajectoire de numérisation ISOvScan à une trajectoire adaptée à une machine-outil est réalisée en donnant la priorité au temps de mesure, avec un contrôle du recouvrement.

Pour une adaptation avec priorité au recouvrement, la trajectoire de numérisation adaptée est obtenue en conservant le vecteur directeur de la ligne de numérisation V_L de la trajectoire de numérisation initiale, et en ne transformant que le vecteur V_C en un vecteur adapté V_C' . Les angles A et C sont obtenus à partir de l'équation (2) en considérant le vecteur original V_L et avec la valeur constante W_{cst} . Le vecteur adapté V_C' est ainsi simplement calculé grâce à l'équation (1). La trajectoire de numérisation adaptée respectant le contrôle de recouvrement définie par (C_E ; V_L ; V_C') et la simulation de numérisation sont montrées sur la figure 4.

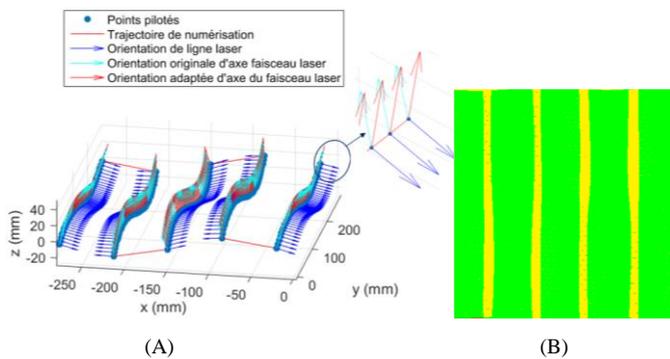


Figure 4. (A) TRAJECTOIRE DE NUMERISATION AVEC PRIORITE AU CONTROLE DU RECOUVREMENT (B) SIMULATION DE NUMERISATION

Les résultats illustrés aux figures 3 et 4 montrent la bonne similitude entre la trajectoire ISOvScan et la trajectoire adaptée respectant le contrôle de recouvrement en termes de qualité de numérisation et de zones de recouvrement. Le calcul de la variation angulaire entre V_C' et V_C met en évidence que cette variation reste inférieure à 22° . Cela garantit que l'angle de numérisation est toujours inférieur à l'angle de numérisation limite (60° pour un tel capteur) lié aux critères de visibilité et de qualité. L'angle de numérisation limite est défini comme l'angle maximum entre l'axe de la source lumineuse et la normale au point mesuré de la surface. Le capteur laser ne peut détecter qu'un point mesuré de la surface si l'angle de numérisation en ce point est inférieur à l'angle de numérisation limite.

Ces résultats suggèrent que la trajectoire de numérisation adaptée avec une priorité donnée au contrôle de recouvrement peut être utilisée comme la trajectoire de numérisation appropriée pour la mesure on-machine dans la machine-outil 5 axes.

IV. APPLICATION ET DISCUSSION

La forme de la surface de la pièce utilisée pour cette application est montrée sur la figure 5(A). La pièce usinée est

incluse dans un bloc de $100 \times 100 \times 30 \text{ mm}^3$. La trajectoire adaptée avec priorité au contrôle du recouvrement et la simulation de numérisation sont présentées sur la figure 6. Cette trajectoire est exécutée sur le centre d'usinage à 5 axes Mikron UCP710 (Figure 5(B)).

Pour exécuter cette trajectoire de façon adéquate sur cette machine-outil deux points doivent être pris en considération. Le premier concerne le lissage de la trajectoire. En effet, un grand nombre de points dans la description de la trajectoire peut ralentir l'exécution de cette dernière, saccader les mouvements de la machine-outil et modifier la densité du nuage de points acquis. Pour éviter cela, nous ré-échantillons notre trajectoire de façon uniforme à partir d'une interpolation des points initiaux par des courbes Bspline de degrés 3. Un deuxième point concerne l'exécution dans l'espace articulaire de la machine-outil de la trajectoire que nous avons calculée dans l'espace pièce. Pour cela, nous utilisons la fonction TRAORI de la CN Siemens 840d. Afin de pouvoir prendre en compte correctement la géométrie du capteur avec cette fonction adaptée à des outils axisymétriques. Nous devons corriger la trajectoire par un décalage correspondant au déport du point piloté par rapport à l'axe de la broche. Ce décalage doit être calculé pour toutes les positions articulaires de la trajectoire.

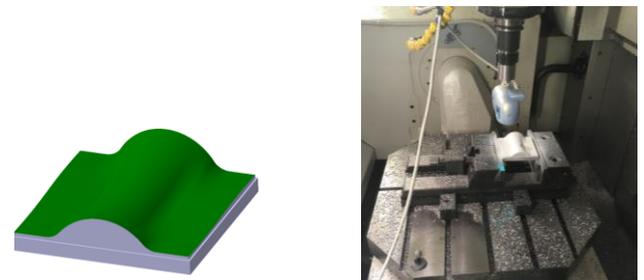


Figure 5. (A) REPRESENTATION DE LA SURFACE (B) REPRESENTATION DU CAPTEUR ET DE LA SURFACE USINEE

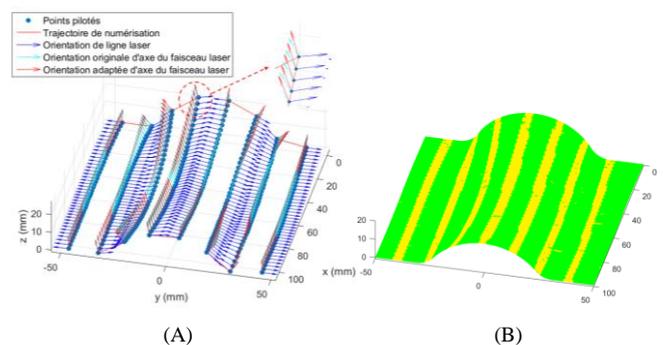


Figure 6. (A) TRAJECTOIRE DE NUMERISATION AVEC PRIORITE AU CONTROLE DU RECOUVREMENT (B) SIMULATION DE NUMERISATION

Pour la mesure on-machine sur une machine 5 axes, il est nécessaire de réaliser une calibration 5 axes du capteur laser-plan dans la machine-outil. La procédure de calibration externe implique la numérisation d'un artefact, classiquement une sphère. L'objectif de la calibration est de déterminer l'orientation et la position du capteur par rapport au repère de la machine, et de définir l'origine du repère du capteur dans lequel les points numérisés seront exprimés. L'origine du repère de mesure est définie par le centre calculé de la sphère numérisée.

La calibration permet ainsi de définir la matrice de transformation du repère du capteur à celui de la machine-outil. Pour cela, il est nécessaire de définir la cinématique du système de numérisation en partant de l'artefact de calibration pour aller vers le capteur. Cette définition est réalisée dans le fichier d'installation **Setup.exe** de Polygonia qui est un logiciel traitant les informations provenant du capteur. Ces informations seront ensuite converties en coordonnées des points. Ce logiciel permet de gérer la calibration du capteur et également de visualiser les nuages de points mesurés.

Le nuage de points obtenu est ensuite aligné sur le modèle nominal de la pièce afin que les résultats puissent être analysés. Pour chaque facette du maillage de la pièce nominale, un cylindre est créé, dont la base est le triangle définissant la facette de la surface. Les écarts géométriques entre les points du cylindre et la facette sont alors calculés pour toutes les facettes. L'écart-type associé σ représentant le bruit de numérisation est calculé pour chaque facette.

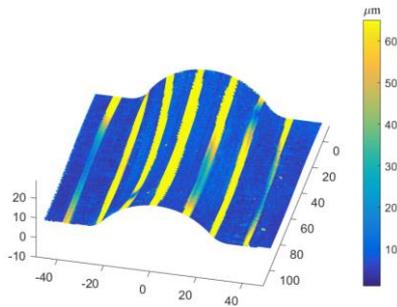


Figure 7. EVOLUTION DE BRUIT DE NUMERISATION

L'évolution du bruit de numérisation réel est représentée à la figure 7, où l'échelle des couleurs représente l'évolution du bruit de numérisation. Il est facile de remarquer que le bruit de numérisation dans les zones de recouvrement (zones jaunes) est supérieur à celui des zones non recouvrement. La qualité de numérisation de la pièce mise en évidence dans la figure 7 montre un résultat attendu avec une bonne qualité de numérisation présentée dans les zones de non-recouvrement en bleu. Les zones de recouvrement en jaune sont relativement constantes et similaires au résultat obtenu par la simulation. Cela valide l'approche utilisée pour la génération de trajectoire de numérisation avec le contrôle du recouvrement, mais aussi de la qualité.

V. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé une méthode pour générer une trajectoire du capteur laser adaptée à la numérisation 5-axes dans une machine-outil. Nous avons adapté avec succès la méthode précédente qui a été développée pour la numérisation par un capteur laser monté sur un robot industriel, garantissant ainsi la qualité de numérisation et le contrôle du recouvrement entre deux passes adjacentes de la trajectoire. Comme la cinématique de la machine-outil ne permet pas d'appliquer directement la trajectoire initiale, il faut adapter la trajectoire en fixant la valeur de l'indexation de broche W. Dans ce but, l'adaptation de la trajectoire avec la priorité donnée au temps de mesure avec un contrôle du recouvrement a été explorée. Le résultat de la numérisation montre que la qualité de numérisation

est assurée dans un ensemble des zones de non-recouvrement. La largeur de zone du recouvrement est relativement constante et similaire au résultat obtenu par la simulation. Ce travail a permis de valider la faisabilité de la mesure on-machine à l'aide d'un capteur laser-plan dans la MOCN 5 axes.

VI. REFERENCES

- [1] L. MEARS, JT. ROTH, D. DJURDJANOVIC, X. YANG, T. KURFESS. "Quality and Inspection of Machining Operations: CMM In-tegration to the Machine Tool". ASME. J. Manuf. Sci. Eng.,131(5), 2009
- [2] U. MUTILBA, E. GOMEZ-ACEDO, G. KORTABERRIA, A. OLARRA, and J. A. YAGÜE-FABRA. "Traceability of on-machine tool measurement: a review". Sensors, 17(7), 2017 p.1605.
- [3] B. ZHAO, G. FENG, L. YAN, Z. DONGYA, Z. WANLI, and Z. FEI. "Study on generation and optimization methodology of on-machine measurement schemes for multi-axis cnc machine tool". In ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2017, pp. V04AT05A017-V04AT05A017. American Society of Mechanical Engineers.
- [4] S. NISHIKAWA, K. OHNO, M. MORI, and M. FUJISHIMA. "Non-contact type on-machine measurement system for turbine blade". Procedia Cirp, 24, 2014, pp. 1-6.
- [5] S. IBARAKI, S. GOTO, K. TSUBOI, N. SAITO, and N. KOJIMA. "Kinematic modeling and error sensitivity analysis for on-machine five axis laser scanning measurement under machine geometric errors and workpiece setup errors". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 96(9-12), 2018, pp. 4051-4062.
- [6] Y. QUINSAT, L. DUBREUIL, C. LARTIGUE. "A novel approach for in-situ detection of machining defects". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 90(5-8), 2017, pp.1625-1638.
- [7] F. PRIETO, H.T. REDARCE, R. LEPAGE, P. BOULANGER. "Range image accuracy improvement by acquisition planning". In Proceedings of the 12th conference on vision interface, Trois Rivieres, Québec, Canada, pp. 18–21, 1999.
- [8] S. SON, H. PARK, K.H. LEE. "Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection". International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 42, no. 8, 2002, pp. 889–897.
- [9] M. MAHMUD, D. JOANNIC, M. ROY, A. ISHEIL, J.F. FONTAINE. "3D part inspection path planning of a laser scanner with control on the uncertainty". Computer-Aided Design, vol. 43, no. 4,2011, pp. 345–355.

[10] Q. WU, J. LU, W. ZOU, D. XU. "Path planning for surface inspection on a robot-based scanning system". In Mechatronics and Automation (ICMA), 2015 IEEE International Conference on, 2015, pp. 2284–2289.

[11] T. KOUTECKY, D. PALOUSEK, and J. BRANDEJS: "Sensor planning system for fringe projection scanning of sheet metal parts". Measurement, vol. 94, 2016, pp. 60–70.

[12] S. LARSSON, J.A.P. KJELLANDER. "Path planning for laser scanning with an industrial robot". Rob. Auton. Syst., vol. 56, no. 7, 2008, pp. 615–624.

[13] N.D.M. PHAN, Y. QUINSAT, S. LAVERNHE, and C. LARTIGUE. "Scanner path planning with the control of overlap for part inspection with an industrial robot". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 98(1), 2018, pp.629-643.

[14] L. BRUNO, S. PETITJEAN, N. RAY, J. MAILLOT. "Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation". ACM Transactions on Graphics (TOG), 21(3), 2002, pp. 362–371.

[15] C. MEHDI-SOUZANI, Y. QUINSAT, C. LARTIGUE, P. BOURDET. "A knowledge database of qualified digitizing systems for the selection of the best system according to the application". CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 13, 2016, pp.15–23.

[16] N.D.M. PHAN, Y. QUINSAT, and C. LARTIGUE. "Simulation of laser-sensor digitizing for on-machine part inspection". In Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing, Springer, 2017, pp. 301–311.

[17] S. LAVERNHE, C. TOURNIER, C. LARTIGUE. "Kinematic performances in 5-axis machining". Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II, 2007, pp. 489–503.

ANNEXE : MODELISATION DE LA STRUCTURE DE LA MACHINE 5 AXES

Le Mikron UCP 710 est un centre de fraissage à 5 axes avec la commande numérique Siemens 840D. L'architecture de cette machine est CAXYZ pour laquelle deux rotations sont appliquées à la pièce et l'orientation de l'outil est fixée dans le repère de la machine.

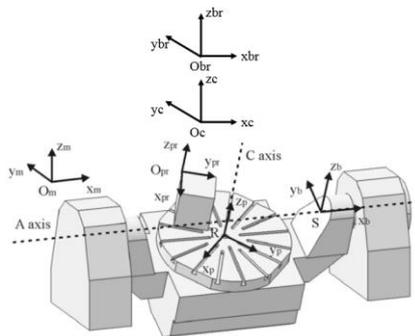


Figure 8. MODELISATION DE LA MIKRON ET REPERE ASSOCIES [17]

- Le repère de la broche ($O_{br}, x_{br}, y_{br}, z_{br}$) est lié à la broche,
- Le repère du capteur (O_c, x_c, y_c, z_c) est lié au capteur,
- Le repère de la machine (O_m, x_m, y_m, z_m) est lié à la structure de la machine ; ses axes sont parallèles aux axes XYZ; z_m est parallèle à l'axe de l'outil,
- Le repère (S, x_b, y_b, z_b) est lié au berceau ; x_b est parallèle à x_m , S est situé sur l'axe A,
- Le repère (R, x_p, y_p, z_p) est lié au plateau ; z_p est parallèle à z_b , R est situé sur l'intersection entre l'axe C et la face supérieure du plateau,
- Le repère de programmation ou le repère de la pièce ($O_{pr}, x_{pr}, y_{pr}, z_{pr}$) est l'axe par rapport à la pièce, et représente le repère utilisé pour la planification de trajectoire de numérisation.

Pour passer d'un repère à l'autre, nous définissons la matrice de passage qui convertit un vecteur exprimé dans un repère, dans un autre repère :

$$P_{cbr} = \begin{bmatrix} \cos(W) & \sin(W) & 0 & x_{O_c O_{br}} \\ -\sin(W) & \cos(W) & 0 & y_{O_c O_{br}} \\ 0 & 0 & 1 & z_{O_c O_{br}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_{brm} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{O_{br} O_m} \\ 0 & 1 & 0 & y_{O_{br} O_m} \\ 0 & 0 & 1 & z_{O_{br} O_m} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_{mb} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{O_m S} \\ 0 & \cos(A) & \sin(A) & y_{O_m S} \\ 0 & -\sin(A) & \cos(A) & z_{O_m S} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

P_{cbr} est la matrice de passage entre le repère du capteur et de la broche ; P_{brm} la matrice de passage entre le repère de la broche et le repère de la machine et P_{mb} , la matrice de passage entre le repère de la machine et le repère du berceau.

$$P_{bp} = \begin{bmatrix} \cos(C) & \sin(C) & 0 & x_{SR} \\ -\sin(C) & \cos(C) & 0 & y_{SR} \\ 0 & 0 & 1 & z_{SR} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; P_{ppr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{RO_{pr}} \\ 0 & 1 & 0 & y_{RO_{pr}} \\ 0 & 0 & 1 & z_{RO_{pr}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Où P_{bp} est la matrice de passage entre le repère du berceau et le repère du plateau tournant, P_{ppr} est définie comme la matrice de passage entre le repère du plateau tournant et le repère de la pièce.

La matrice de passage M du repère du capteur au repère de la pièce est alors définie comme suit :

$$M = P_{ppr}^{-1} \cdot P_{bp}^{-1} \cdot P_{mb}^{-1} \cdot P_{brm}^{-1} \cdot P_{cbr}^{-1}$$