

Adaptation des trajectoires outils sur machine cinq axes ultrasonique pour l'usinage de la prothèse de genou

Salim BOUKEBBAB^a, Julien CHAVES-JACOB^b, Nouredine AZZAM^a, Jean-Marc LINARES^b,

^a Laboratoire Ingénierie des Transports et Environnement, Faculté Sciences de la Technologie, Campus universitaire de Zarzara, Université Constantine 1, 25000 Constantine, Algérie. E-mail: boukebbab@yahoo.fr

^c Aix-Marseille Université, CNRS, ISM UMR 7287, 13288, Marseille cedex 09, France.

Résumé: Dans cet article, nous avons développé une nouvelle méthode pour l'adaptation des trajectoires d'usinage aux pièces déformées au niveau d'une composante fémorale de la prothèse du genou (condyles fémorale). Comme les prothèses de genoux ont une épaisseur faible qui entraîne des déformations importantes lors de leurs fabrications. Au premier temps on a utilisé une méthode d'alignement basée sur l'algorithme I.C.P. (Iterative Closest Points) et consiste à trouver la transformation optimale qui va correspondre au mieux une trajectoire d'usinage calculée sur la surface nominale au modèle bruité de modèle STL. Après le recalage de la trajectoire d'usinage ; nous la déformons par projection et décalage selon la normale du modèle STL pour enlever une épaisseur constante. Afin d'améliorer l'état de surface et éviter les ralentissements, il est nécessaire de procéder à un lissage de la trajectoire.

Mots-Clés: usinage, trajectoire d'usinage, prothèse de genou, alignement, déformation, lissage trajectoire.

Abstract: This study proposes a new method to adapt the geometry of the toolpath to a specified target. This case is normally present in the polishing of the femoral component of knee prostheses. The aim of this study is to contribute to the automation of prosthesis production, notably, in the preparation of surface polishing. The proposed toolpath deformation method is composed of three steps: alignment, toolpath deformation, and toolpath smoothing. Alignment between the measured surface of the roughcast prostheses and the nominal toolpath is carried out by an Iterative Closest Point (ICP) algorithm. Subsequently, the toolpath is deformed to remove the constant thickness of the roughcast prostheses. To improve the machined surface quality, a smoothing stage is carried out on the obtained toolpath.

Key-words: Polishing, toolpath, knee prostheses, alignment, toolpath deformation, and toolpath smoothing

1. Introduction

Les prothèses de genoux ont une épaisseur faible qui entraîne des déformations due à leur procédé d'obtention de brut. De ce fait, la géométrie a une influence faible sur la durée de vie de la prothèse ; car la pièce intercalaire en polyéthylène va se déformer pour compenser la géométrie globale de la partie fémorale qui est en cobalt chrome. Par contre, les discontinuités de surfaces et l'état de surface (rugosité et ondulation) ont une influence prépondérante sur la durée de vie ; Ce qui implique que nous devons avoir un état de surface très précis tous ont respectons l'épaisseur de la prothèse qui risque de se fissurée sous peine de diminution de cette dernière [1].

Lors de la réception des pièces brutes, nous procédons à des mesures de la topologie externe de la prothèse afin de connaître ainsi la déformation de la génératrice de ces dernières. A partir de la mesure, un modèle STL représentant la surface externe de la prothèse est créé (figure 1).

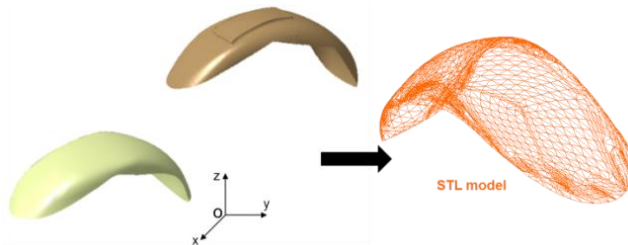


Figure 1: Mesure par capteur optique et création de modèle STL

Projeter sur une surface déformée, les trajectoires d'usinage issu de la FAO définies sur le modèle nominale (non déformé), permet d'éviter des traces sur la surface et éviter ainsi de faire la rétro-conception de chaque pièce brute déformée pour refaire un programme spécifique d'usinage.

L'objectif estampé de ce travail de recherche est de modifier une trajectoire d'usinage calculée sur un modèle nominal pour enlever une épaisseur constante sur une surface brute de fonderie. Le cas d'application privilégié est l'ébauche des parties fémorales des prothèses de genoux (implant fémoral: condyles). La génération de trajectoire d'usinage est effectuée seulement sur la partie supérieure de condyle de genou (figure 2).

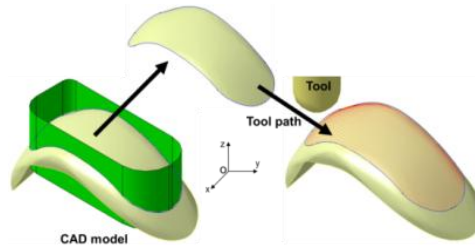


Figure 2: Composante fémorale d'une prothèse du genou (Condyle fémoral).

La déformation de la trajectoire outil est réalisée en trois temps (Figure 3):

- Alignement de la trajectoire outil et le modèle STL par l'utilisation de l'algorithme d'ICP,
- Déformation de la trajectoire d'outil,
- Décalage de la trajectoire outil par une épaisseur constante (a_p),

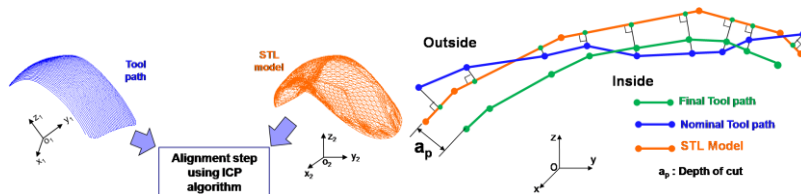


Figure 3 : Etape d'alignement et déformation de la trajectoire d'usinage

Généralement, les systèmes de CFAO calculent la trajectoire outil dans un format neutre et universel APT. Ce dernier est généré automatiquement à partir des trajectoires outils issues de la FAO sous CATIA V5®. Dans l'APT, la trajectoire est définie par rapport à des éléments géométriques nominaux à usiner. La trajectoire d'usinage est défini par l'ensemble des positions successives de l'outil calculée sous CATIA V5®, nous permet d'obtenir les coordonnées des points de contact $P_{cc}(x_i, y_i, z_i)$ et les axes d'outil $\vec{u}(i, j, k)$ figure 4.

```

X   Y   Z   I   J   K
GOTO / -2.228, -21.413, 11.143, 0.000, 0.000, 1.000
GOTO / -2.228, -21.341, 11.211, 0.000, 0.000, 1.000
GOTO / -2.228, -20.688, 11.831, 0.000, 0.000, 1.000
GOTO / -2.228, -19.947, 12.504, 0.000, 0.000, 1.000
GOTO / -2.228, -19.190, 13.157, 0.000, 0.000, 1.000
GOTO / -2.228, -18.417, 13.791, 0.000, 0.000, 1.000
...

```

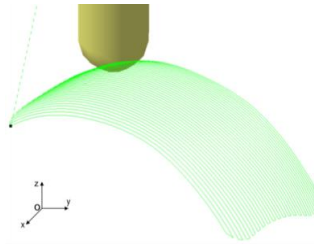


Figure 4: Partie du format APT sous CATIA

2. Alignement de la trajectoire outil

La figure 5 par une analyse de la déviation après alignement de la trajectoire outil et le modèle STL montre que le défaut de forme varie de -0,2017 [mm] à 0,4166 [mm], ce qui implique une oscillation de la trajectoire outil qui engendra automatiquement une discontinuité de surface usinée d'où un état de surface amoindrie [2]. A partir de cet instant nous allons procéder à la déformation de la trajectoire outil de départ pour qu'elle puisse épouser parfaitement la morphologie du modèle STL, avec une marge d'erreur d'approximation maîtrisable [3].

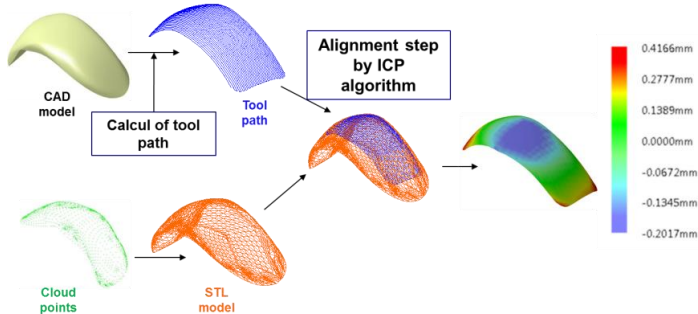


Figure 5: Résultats de l'étape d'alignement

3. Déformation et décalage de la trajectoire

La déformation de la trajectoire outil, pour qu'elle vienne se coller sur le modèle STL se réalise en trois étapes (figure 6) :

- Projection des points (Cc point) sur le modèle STL,
- Vérification de l'appartenance des points projetés aux éléments du modèle STL,

- Décalage des points projetés selon la normale ($\vec{h}$) des éléments triangulaires du modèle STL par une quantité constante (a_p : surépaisseur d'usinage).

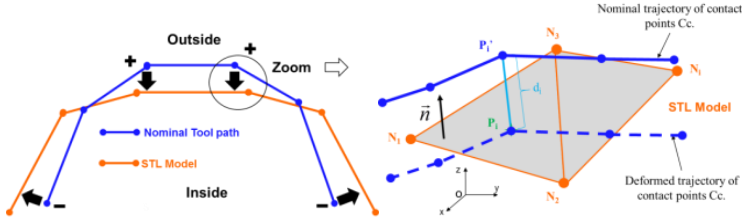


Figure 6: Deformation de la trajectoire nominale

3.1 Etape de projection

Une surface au format STL est composée de plusieurs surfaces planes sous forme de triangles définis par leurs sommets [4]. Le calcul de la projection d'un point sur un plan n'est pas difficile, mais le problème c'est de connaître sur quel plan il faut le faire. Pour cela, le calcul de distance entre un point P'_i et l'élément triangulaire du modèle STL consiste d'abord à trouver le triangle le plus proche de P'_i , puis à appliquer le calcul de distance point/plan par la formulation suivante :

$$\vec{OP}_i = \vec{OP}'_i + d_i \cdot \vec{h} \text{ and } d_i = \vec{P}'_i \cdot \vec{N}_i \cdot \vec{h} \quad (1)$$

Pour cela, trois cas de figure peuvent alors se présenter (figure 7) :

- Si $P_i(x_i, y_i, z_i)$ se situe à l'intérieur du triangle ayant comme coordonnées des nœuds $N_1(x, y, z)$, $N_2(x, y, z)$ et $N_3(x, y, z)$, nous le considérons comme étant la projection du point $P'_i(x_i, y_i, z_i)$,
- Sinon on passe à un autre triangle pour effectuer le calcul de projection,
- Si un point se projette sur plusieurs triangles on conserve celui ayant la distance d_i minimal (figure 9 à droite).

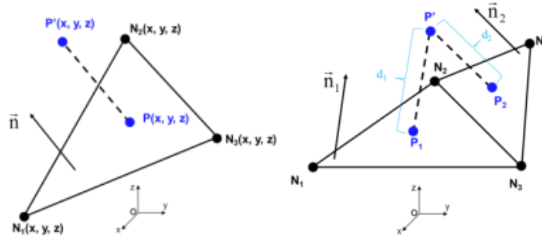


Figure 7: Projection des points sur le modèle STL

Les points projetés $P_i(x_i, y_i, z_i)$ que nous noterons $P_{Cc_Def}(x_i, y_i, z_i)$ doivent être convertis en points pilotés $P_{CL_Def}(x_i, y_i, z_i)$ connus par le post processeur de la machine outil, par une transformation géométrique (figure 8). La relation vectorielle entre les points de contact P_{Cc_Def} et les points pilotés outil P_{CL_Def} diffère selon la géométrie de l'outil. Dans notre cas, l'usinage est réalisé par un outil hémisphérique de part la simplicité de sa géométrie qui nous permet mathématiquement de le positionner plus facilement lors de l'usinage.

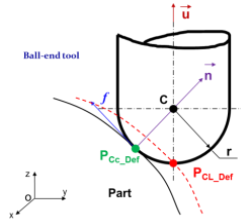


Figure 8: Les points projetés convertis en points pilotés

3.2 Vérification l'appartenance de la projection

Soit l'élément triangulaire (figure 9) ayant les sommets N_1 , N_2 et N_3 , et $\vec{n}$ son vecteur normal ; la projection du point P_i et P_i sur l'élément plan. Il existe plusieurs méthodes de vérification de l'appartenance de la projection d'un point à l'intérieur du triangle. Pour notre cas, on se base sur le calcul des aires par la formulation suivante :

$$Area_{Triangle} = \frac{1}{2} \left\| \vec{N_1 N_2} \wedge \vec{N_1 N_3} \right\| \quad (2)$$

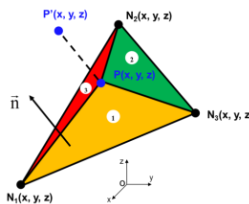


Figure 9: Vérification de l'appartenance de la projection.

On dit que $P(x, y, z)$ est à l'intérieur du triangle seulement si :

$$Area(N_1 N_2 N_3) = Area(PN_1 N_3) + Area(PN_3 N_2) + Area(PN_2 N_1)$$

3.3 Décalage de la trajectoire d'usinage

Pour pouvoir enlever de la matière sur la face extérieure de la prothèse une surépaisseur d'usinage doit être imposé comme paramètre de coupe. Pour cela, nous allons décaler du côté matière les points projetés sur le modèle STL (figure 10) d'une quantité « ap : profondeur de passe», par la formulation suivante :

$$\vec{OP}_{Cc_Def,i} = \vec{OP}'_i + (d_i - a_p) \vec{n}^p \quad (4)$$

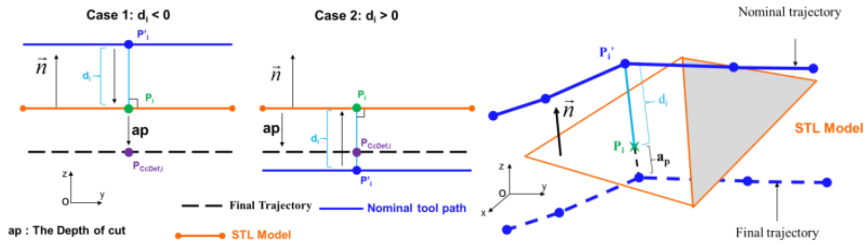


Figure 10: Décalage de la trajectoire d'usinage.

4. Phase expérimentale

La géométrie de l'implant fémoral (condyles) de l'articulation du genou est complexe, de ce fait leur usinage nécessite l'utilisation de machines multi-axes. Pour cela nous avons utilisé dans notre expérimentation un centre d'usinage 5 axes ULTRASONIC 20 linéaire, équipée d'une commande numérique Siemens, 840D, alors que le matériau utilisé est de la raisine (figure 11). Les essais ont été réalisés avec les conditions de coupe suivantes : usinage avec lubrification ; outil hémisphérique (Ball end tool) de diamètre $D = 10$ [mm] ; vitesse de rotation $n = 15000$ [tr/min] ; vitesse d'avance $v_f = 0.05$ [mm/min] et une profondeur de passe $ap = 0.2$ mm. Le processus d'usinage est divisé en trois opérations : ébauche, semi finition et finition. Les procédures de déformation de trajectoire outil sont incluses dans l'opération de la finition. Les trajectoires d'usinage initial ont été générées selon des plans parallèles dans le mode Advanced Machining de CATIA V5® en finition. L'usinage est réalisé en considérant une trajectoire déformée et une autre nominale.



Figure 11: Usinage sur une machine 5 axes Ultrasonique

Les mesures réalisées sur machine à mesurer (figure 12), équipée de système à lumière structuré, montrent à partir de la carte de déviation, que les erreurs de forme sur condyle usinée par la trajectoire nominale varient entre -0,5 à 0,1 [mm], et le condyle usiné par la trajectoire déformée varient de -0,06 à 0,02[mm].

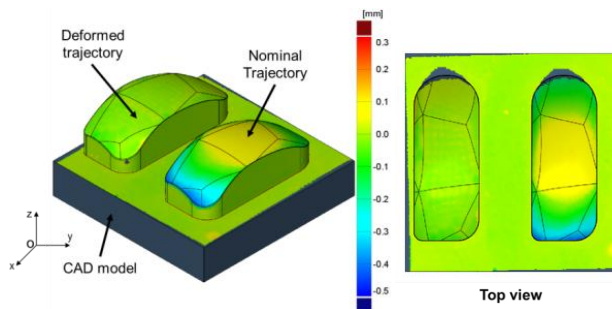


Figure 12: Comparaison des formes de condyle.

Il est a noté ici que les couleurs froides (vers le bleu) représentent les distances négatives alors que les couleurs chaudes (vers le rouge) représentent les distances positives. De ce fait, on remarque une réduction importante des écarts avec une uniformisation de la coupe sur toute la surface externe du condyle usiné avec trajectoire déformée comparativement à celui usiné par trajectoire nominale. Néanmoins nous avons remarqué des oscillations sur la surface externe du condyle usiné avec trajectoire déformée d'où un état de surface amoindri (figure 12). Afin d'améliorer le suivi de trajectoires et d'éviter les ralentissements, il est alors nécessaire de procéder à un lissage de la trajectoire, additivement à cela, prendre un modèle STL plus dense « augmenté le nombre d'éléments ».

5. Correction et solution proposées

La génération de trajectoires d'usinage à partir de modèle STL, génère des perturbations de trajectoire déformée d'où des ralentissements de la machine et des défauts sur la pièce. Ces phénomènes sont nuisibles à la productivité ainsi qu'à la qualité des surfaces usinées, il est alors nécessaire de procéder à un lissage de la trajectoire. Cette problématique du lissage a été largement traitée dans le domaine de l'usinage [5] [6] [7] [8] [9]. Ho et al. proposent un algorithme d'interpolation basé sur les quaternions [5] pour « lisser » les variations d'orientation. Il couple sa méthode à une correction de la position pour garantir la qualité et la rapidité d'usinage. Langeron et al. proposent une méthode de lissage basée sur des courbes polynomiales en 5 axes comme format d'interpolation [9] selon ce formalisme, il est nécessaire de donner à la CN les pôles, les poids, la séquence nodale et le degré de la NURBS que l'on cherche à interpoler.

Afin de résoudre le problème d'oscillation des axes x , y et z , nous proposons deux méthodes de lissage de la trajectoire avec une tolérance IT maîtrisable :

- Lissage suivant l'axe x ,
- Lissage suivant les 3 axes (x, y, z) .

L'approximation polynômiale d'une série de points permet de construire une courbe au sens des moindres carrés.

5.1 Deuxième expérimentation

Nous allons dans cette étape refaire l'usinage avec le même procédé et les mêmes paramètres d'usinage cité plus haut, suivi d'une étape de mesures sauf que les trajectoires usinages déformées cette fois ci seront lissées avec la procédure de lissage selon en (x) et (x,y,z) .

La figure 13 montre les résultats de la mesure, ou l'on remarque que les écarts ont été réduites et devenus uniformes sur toute la surface de condyle. A partir de la carte de déviation, les erreurs de forme sur le condyle usinée par la trajectoire lissée en (x) est nettement meilleur que celui usinée par la trajectoire lissée en (x,y,z) .

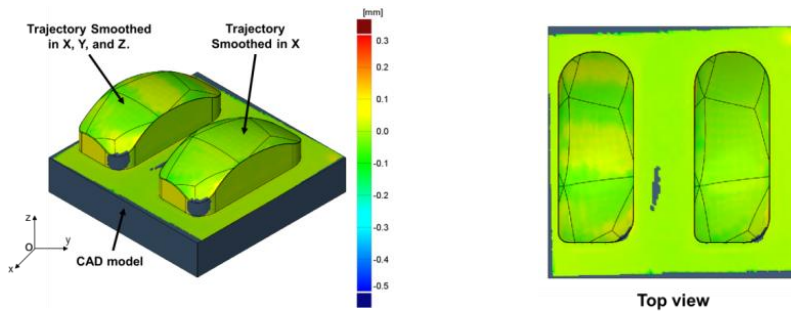


Figure 13: Condyle lissée en x et xyz

Parmi les différentes méthodes de lissage testées (lissage en (x,y,z) et lissage en (x)), nous retenons la procédure de lissage suivant l'axe x avec tolérance de lissage $IT_{\text{smoothing}} = 0,02$ [mm] est la meilleure. Cette situation malgré les résultats positifs et prometteuses, peut aussi être amélioré par un maillage plus fin du model STL.

6. Conclusion

Nous avons présenté dans cet article une nouvelle méthode de déformation de la trajectoire d'usinage pour enlever une épaisseur constante sur une surface brute de fonderie. En premier lieu le système commence par effectuer une mise en correspondance ; par l'utilisation de l'algorithme ICP de la trajectoire d'usinage nominale avec son modèle brut au format STL. L'algorithme ICP permet alors de trouver la transformation allant d'un modèle 3D à un ensemble de données obtenu par un système d'acquisition. Tout ceci, fait de cette méthode la plus favorite pour être utilisée dans notre cas d'étude. En second lieu, la méthode qu'on propose pour déformée la trajectoire d'usinage (projection et décalage) est une méthode généraliste pour usiner tous types de pièces de formes complexes. Les différentes méthodes de lissage appliquées permettent d'améliorer la trajectoire d'usinage et ainsi amélioré la qualité de la pièce finale.

7. Références

[1] Gacon Gérard, Hummer Jacques, Les prothèses tricompartimentaires du genou de première intention. Techniques opératoires.Problèmes et solutions. Collection GECCO. Springer-VerlagFrance, Paris (2006).

- [2] Boukebbab S, Bouchenitfa H., Linares J.M., « Development of a mathematical procedure for modelling and inspecting complex surfaces for measurement process », Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing, vol. 78 pp. 37–43.(Février 2009).
- [3] Kaneko Shun'ichi, Kondo Tomonori, Miyamoto Atsushi, « Robust matching of 3D contours using iterative closest point algorithm improved by M-estimation », The Journal of the Pattern Recognition Society. Vol. 36, pp. 2041–2047. (2003).
- [4] Boukebbab S., Bouchenitfa H., Boughouas H. and Linares J.M., « Applied Iterative Closest Point algorithm to automated inspection of gear box tooth », International Journal of Computers & Industrial Engineering Vol. 52. pp.162–173. (2007).
- [5] Mign-Che Ho. Yean-Ren Hwang. Chang-Hsia Hu. « Five-axis tool orientation smoothing using quaternion interpolation algorithm ». International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 43. pp. 1259–1267. (2003).
- [6] Vincent Pateloup. « Amélioration du comportement cinématique des machines-outils UGV : Application au calcul de trajets d'évidement de poches ». Thèse de doctorat, Clermont-Ferrand. France. (2005).
- [6] Cédric Castagnetti, Emmanuel Duc, Pascal Ray. « The Domain of admissible orientation concept: A new method for five-axis tool path optimization ». Computer Aided Design. Vol. 40. pp 938–950. (2008).
- [7] Pierre-Yves Pechard. Christophe Tournier. Claire Lartigue. Jean-Pierre Lugarini. « Geometrical deviations versus smoothness in 5-axes high-speed flank milling ». International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 49. pp 454–461. (2009).
- [8] Xavier Beudaert. Pierre-Yves Pechard. Christophe Tournier. « 5-axis tool path smoothing based on drive constraints ». International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 51. pp 958–965. (2011).
- [9] Jean Marie Langeron. Emmanuel Duc. Claire Lartigue. Pierre Bourdet. « A new format for 5-axis tool path computation, using Bspline curves ». Computer Aided Design. Vol. 36. pp. 1219–1229. (2004).