

Reverse Engineering et Copiage rapide de nuages de points numérisés

Mohanad Makki¹, Christophe Tournier¹, François Thiébaud^{1,2}, Claire Lartigue^{1,2}

¹ ENS de Cachan

² IUT de Cachan, Université Paris-Sud 11,
Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée
Ecole Normale Supérieure de Cachan, 61 av. du Pt Wilson,
94235 Cachan cedex – France, Tel : +33 1 47 40 22 15 – fax : +33 1 47 40 22 20,
e-mail : name@lurpa.ens-cachan.fr

Résumé :

Dans cette communication nous nous intéressons à démontrer la faisabilité d'une démarche copiage rapide de forme vis-à-vis d'une approche classique de reproduction de forme s'appuyant sur une démarche de Reverse Engineering. Nous montrons au travers d'une analyse des formes réelles et par simulation que le copiage direct est plus performant en termes de fidélité à la forme dans le cadre de l'usinage à 3 axes. De même, le copiage rapide forme permettant de s'affranchir de l'étape de reconstruction il est également beaucoup plus rapide et simple à mettre en œuvre.

Abstract :

This paper deals with the feasibility of rapid copying for form reproduction as regards a classical approach based on Reverse Engineering. In particular, we show through a n-buffer simulation and after real 3-axis machining that rapid copying is more efficient in terms of conformity to the geometry. As the stage of surface reconstruction is removed, rapid copying is also a process much faster and simple to implement.

Mots-clefs : Nuage de points, Trajectoires d'usinage, qualité géométrique

1 Introduction

De nombreuses méthodes de reproduction de forme s'appuient sur une démarche de Reverse Engineering (RE). En effet, l'objectif est de convertir un ensemble de données discrètes en un modèle continu qui peut servir de base à de nombreuses applications, en particulier l'usinage ou encore le prototypage rapide (Fig.1). La procédure peut être caractérisée par 3 étapes principales : acquisition des données ; traitement des données acquises ; modélisation CAO (Varady *et al.* 1997). Malgré les nombreuses avancées en modélisation CAO de données discrètes et les outils de plus en plus performants à disposition, l'étape de RE est rarement automatique ; elle est longue, fastidieuse et nécessite une très bonne maîtrise des logiciels. Elle est en particulier fortement tributaire de la qualité des données initiales mais aussi de la façon dont les données sont traitées avant modélisation : partitionnement, recherche de lignes caractéristiques, extraction des lignes de bords, etc.

Le copiage rapide de formes complexes est une opération d'usinage qui permet d'élaborer un produit directement à partir de son image numérisée sous forme d'un grand nuage de points. Cette technologie permet de s'affranchir de l'étape de reconstruction de surfaces car le nuage de points, même s'il est fortement bruité et incomplet, peut servir de support au calcul de trajectoires. De plus, l'utilisation de l'usinage grande vitesse fait du copiage direct de forme un outil essentiel associé au domaine du prototypage rapide.

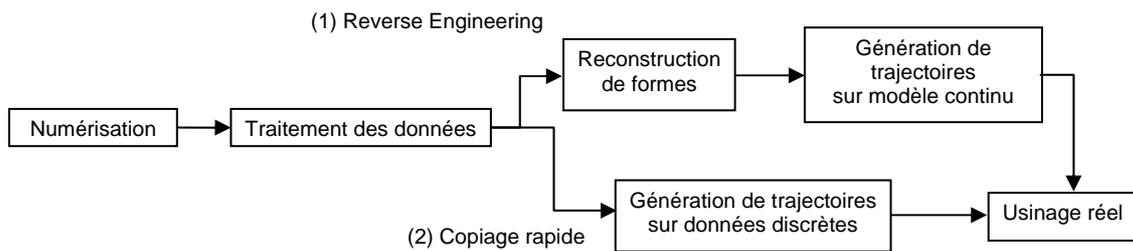


FIG. 1 – De la numérisation de surface à l’usinage de forme

Dans la communication proposée, nous nous intéressons à démontrer la faisabilité de la démarche de copiage rapide de forme et son intérêt vis-à-vis d’une démarche classique de reverse engineering. Dans une première partie nous nous attachons à mieux définir ce qu’est le processus de copiage de forme dans un contexte d’usinage 5 axes positionnés. Les 2 démarches, démarche classique et copiage direct sont alors menées en parallèle sur un nuage de points issu d’une numérisation à l’aide d’un capteur laser-plan d’une forme de modèle CAO inconnu. Pour la démarche classique, les outils de reconstruction de formes et d’usinage sont ceux d’un logiciel de CFAO. Dans le cas du copiage de forme, les algorithmes proposés sont ceux développés au laboratoire. Une étude comparative est en particulier menée sur des critères géométriques et en particulier de fidélité à la forme.

2 Processus de copiage rapide de forme

L’objectif que nous nous sommes fixé est de pouvoir recopier une forme complexe par usinage, le plus fidèlement possible, le plus rapidement possible et en une seule phase afin d’éviter les prises de pièces trop complexes. C’est pourquoi nous envisageons un processus basé sur l’Usinage Grande Vitesse à 5 axes.

Le processus de copiage de forme développé s’appuie sur le nuage brut, dense, bruité et hétérogène, issu de la numérisation de l’objet avec plusieurs orientations capteur. Il se décompose en deux étapes principales, le découpage topologique et technologie du nuage et la génération de trajectoires. Le découpage nous permet de partitionner le nuage en fonction de différents critères afin de former des groupes de points qui seront usinés dans la même sous phase, c’est-à-dire avec la même orientation de l’outil. Une fois les points regroupés en paquet, nous appliquons des algorithmes de génération de trajectoires en ébauche et en finition. Dans le cadre de l’usinage de données issues de numérisation, la difficulté principale en génération de trajectoires est la perte de continuité et le manque de structure des données. Le calcul de la normale à la surface permettant de positionner l’outil s’avère également plus délicat.

2.1 Découpage topologique et technologique

Le regroupement des points du nuage en paquets usinés avec la même orientation de l’outil nécessite de déterminer une normale pour chaque point du nuage. On dénombre plusieurs méthodes dans la littérature qui traitent ce problème (Meek *et al.* 2000) (Park *et al.* 2006). La méthode que nous avons retenue s’appuie sur une voxelisation du nuage de points dont la finesse dépend de la qualité de l’usinage souhaité. Pour chaque voxel, on calcule le barycentre des points contenus dans le voxel. De plus, on définit une normale au voxel par la normale au plan des moindres carrés associés aux points du voxel. Le calcul de la normale peut être raffiné intègre en fonction des normales des voxels voisins. Nous obtenons alors une voxel-map, c’est-à-dire un ensemble de triplets voxel/normale/barycentre. Le découpage du nuage en paquets

selon des critères topologiques et technologiques est alors effectué selon des critères tels que l'accessibilité de l'outil (risque de collisions, architecture de la machine), la position relative de l'outil par rapport à la surface (coupe au centre, stratégies pour zones verticales ou horizontales) ou encore le nombre et la position des points constituant un paquet (Breteau *et al* 2006).

2.2 Génération de trajectoires d'usinage sur données discrètes

Quelle que soit la méthode, la génération de trajectoires s'appuie sur une structuration des données, soit sous forme de maillage basé sur les lignes de numérisation Lin *et al.* (1998), soit à partir de la définition d'un réseau de cellules. Feng *et al.* (2005) ont ainsi proposé une méthode de calcul en finition basée sur la définition d'un réseau de cellules 2D dont les dimensions sont liées à la tolérance d'usinage et à la hauteur de crête admissible. Chaque nœud de la cellule correspond à une position outil et une méthode d'optimisation est proposée afin d'optimiser la position du nœud de la cellule de façon à minimiser les erreurs d'usinage. Cette méthode particulièrement prometteuse nécessite cependant de nombreuses étapes et est complexe à mettre en œuvre. Dans l'objectif d'usiner un nuage de points dense, bruité et incomplet, nous avons proposé des méthodes de calcul de trajectoires simples qui ont évolué du 3 axes (Osty *et al.* 2000) au 5 axes positionnés (Breteau *et al.* 2006). Comme dans le cas des méthodes proposées dans la littérature, les algorithmes nécessitent une structuration des données qui est effectuée lors de l'étape de découpage topologique et technologique par la définition d'une voxel-map et par l'utilisation d'une grille.

2.2.1 Stratégie d'ébauche

La stratégie d'usinage adoptée est une stratégie de type « z-level », pour laquelle l'opération d'ébauche est réalisée par usinage de couches parallèles orthogonales à l'axe d'outil z (Fig.2). Le mode de balayage dans chaque couche z_i est le mode zigzag. Le calcul de la trajectoire s'appuie sur les paramètres spécifiés par l'utilisateur comme la géométrie de l'outil, l'engagement axial et radial de l'outil, le mode de balayage. Une grille est construite dans chaque couche z_i , les paramètres d'engagement radial et de pas longitudinal définissant les dimensions de la grille. L'organisation des nœuds n_{ij} de la grille est effectuée selon le mode de balayage adopté. Pour chaque nœud n_{ij} , on détermine si l'outil est en collision avec les barycentres des voxels voisins (Fig.3). Seuls les nœuds pour lesquels l'outil n'est pas en contact avec les barycentres voisins définissent les points de la trajectoire T_i de la couche c_i . Pour les autres, une trajectoire hors matière est insérée.

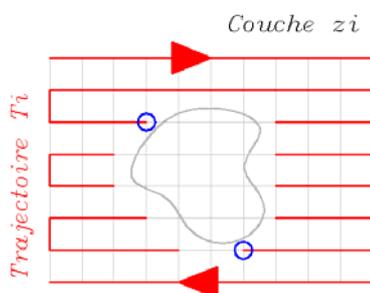


FIG. 2 – Stratégie d'ébauche

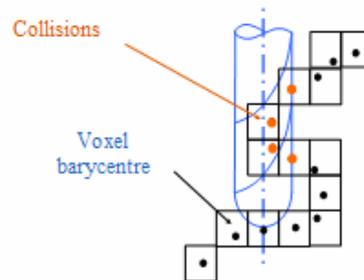


FIG. 3 – Posage de l'outil

Le lien entre les trajectoires d'usinage est assuré par des trajectoires d'approche axiales ou en rampe. Pour le moment, la gestion des collisions entre l'outil et le nuage n'est pas assurée durant les approches en rampe. La solution proposée permet donc uniquement l'usinage de pièces dépourvues de poches.

2.2.2 Stratégie de finition

La méthode utilisée est basée sur le principe du zbuffer inverse, Suzuki *et al.* (1991), et s'appuie également sur une grille dont les pas longitudinaux et transversaux sont directement liés aux paramètres de tolérance d'usinage et de hauteur de crête. Les nœuds de cette grille sont rangés dans un ordre spécifique déterminé en fonction du mode de balayage souhaité. Le posage de l'outil sur le nuage est effectué pour chacun des nœuds du maillage. Pour cela on récupère les points du nuage qui sont contenus dans un cylindre de révolution de rayon égal au rayon de l'outil boule et d'axe z passant par le nœud considéré. A partir de ces points, on détermine l'altitude des intersections entre l'axe de l'outil et les sphères de rayon égales au rayon de l'outil centrées sur chaque point du nuage participant au posage. La position de l'outil est alors donnée par l'intersection d'altitude maximale (Breteau *et al.*, 2006).

3 Comparaison des deux approches

La comparaison de l'approche basée sur le reverse engineering (RE) et le copiage direct de points s'effectue sur une pièce de test dont le modèle CAO est inconnu (Fig.4). L'objectif est ici de valider la pertinence de l'approche de copiage direct vis-à-vis de l'approche classique de RE d'un point de vue de la fidélité et de la rapidité. Pour cela nous mettons en œuvre un usinage à 3 axes afin de simplifier le problème dans une première approche. La numérisation à l'aide d'un capteur laser-plan monté sur machine à mesurer est réalisée selon 3 vues différentes. Le nuage de points initial (470 000 points) est filtré à l'aide d'un critère d'erreur de corde de 0.02mm, ce qui conduit à un nuage de 170 000 points (Fig.4). Les deux démarches sont alors menées en parallèles. Concernant l'approche basée sur le RE, les différentes étapes de reproduction de la forme sont les suivantes : importation du nuage de points dans le logiciel, reconstruction de surfaces sur le nuage de points, génération de trajectoires d'usinages sur le modèle surfacique, usinage de la forme sur centre de fraisage.



Fig. 4 – Reproduction de la forme en RE

La reconstruction, réalisée à l'aide des outils de l'atelier Quick Surface Reconstruction du logiciel CATIA V5®, est basée sur le découpage du nuage de points en sous-ensembles auxquels une surface est associée. Les surfaces ainsi associées sont ensuite assemblées et les trous sont comblés de façon à obtenir une surface au minimum continue C0. Le résultat obtenu, peu satisfaisant (présence de coutures, lissage non optimal dans certaines zones, etc.), est cependant obtenu en quelques heures (Fig.4). Afin de tester nos algorithmes dans le cadre d'un changement d'échelle, un facteur d'échelle de 7/20 est appliqué à la surface reconstruite. Celle-ci sert alors de support à la génération de trajectoire, puis à l'usinage réel. Le même facteur d'échelle est appliqué aux points du nuage pour la démarche de copiage rapide. La diminution des dimensions ne génère pas de difficulté au posage de l'outil sur le nuage. Les trajectoires d'usinage ont été générées avec une stratégie de guidage selon des plans parallèles en finition avec un outil hémisphérique de diamètre 8 mm. Le pas de la grille dans le cas du copiage est de

0.2 x 0.2. En ce qui concerne les trajectoires issues du logiciel de FAO, la tolérance d'usinage et la hauteur de crête sont égales à 0.01mm. L'usinage a été mené sur le centre d'usinage du laboratoire dans un bloc d'aluminium de 100x100x60, la vitesse d'avance programmée étant de 5m/min.



FIG. 5 – Détails des pièces usinées (à gauche copiage, à droite RE)

4.3 Comparaison des résultats

La comparaison des deux approches est faite d'un point de vue géométrique sur des simulations (Fig.6) et sur les pièces issues d'un nuage réel (Fig.5). Rappelons que l'objectif du copiage est de respecter la forme initiale, en minimisant les écarts géométriques et en respectant les concavités. La méthode consiste à simuler l'enveloppe du trajet de l'outil pour les deux opérations de finitions et d'évaluer les écarts géométriques avec le nuage de points. Pour cela nous utilisons les outils de certification de trajectoires développés au Lurpa et en particulier la simulation d'usinage par Nbuffer, Jerard *et al.* (1987). Ce type de simulation s'appuie sur une représentation point/normale de la surface à usiner. Dans notre cas, à chaque point du nuage il faut donc associer une normale. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser la représentation surfacique établie dans l'approche reverse engineering pour déterminer les normales en chaque point du nuage (Fig. 4). Malgré les imperfections introduites dans cette reconstruction, le défaut d'orientation des normales n'a que peu d'influence sur le critère de fidélité à la forme recherché. La simulation s'effectue donc en plusieurs étapes : extraction des normales du modèle surfacique dans logiciel CAO utilisé, construction du modèle point/normale de l'objet, simulation de l'usinage par intersection entre le modèle point/normale et les trajectoires d'usinage.

Nous avons appliqué cette simulation sur 20000 des 170000 points du nuage (Fig 6). On remarque tout d'abord que les écarts sont presque toujours positifs dans le cas du copiage, ce qui est cohérent avec la méthode de posage de l'outil. Les détails du modèle réel sont révélés : marque sur la tempe de droite (Fig 6), enfoncement sur la joue gauche, lèvre inférieure saillante (Fig 5). La qualité du copiage est donc essentiellement liée à l'accessibilité de l'outil (diamètre) et aux pas de la grille. En effet, seules les zones verticales pour lesquelles le pas longitudinal de la grille est trop grand (vers le menton) montrent des écarts négatifs. De même, le pas transversal fait apparaître des crêtes importantes dans les zones verticales près des tempes. L'approche par reverse engineering génère des écarts positifs et négatifs, ce qui traduit le fait que le modèle surfacique associé passe au mieux des points selon le critère des moindres carrés. Cela provoque des ondulations ainsi qu'un lissage des détails, en particulier sur les lèvres et le nez (Fig 5 et 6). La fidélité à la forme est donc plus faible. Par contre, le logiciel gère mieux la tolérance d'usinage et la hauteur de crête.

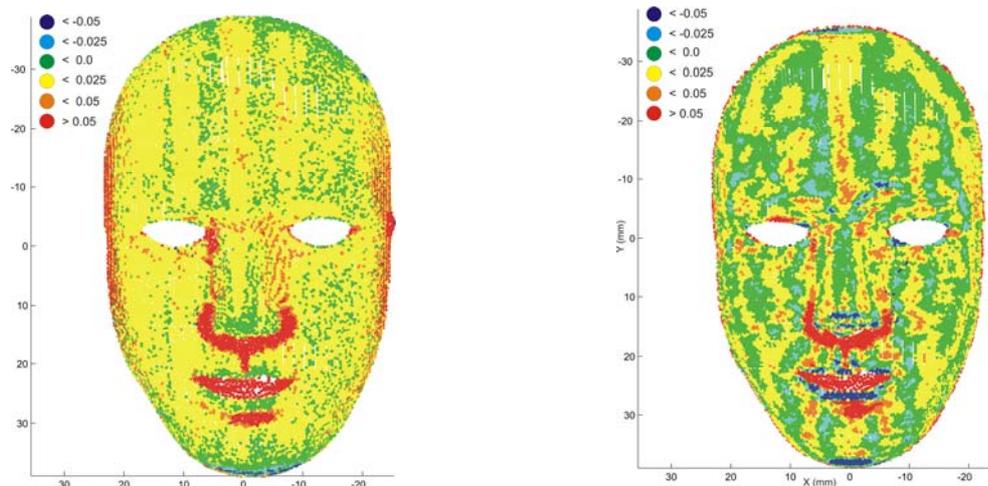


FIG. 6 – Comparaison des simulations d’usinage (à gauche copiage, à droite RE)

5 Conclusions et perspectives

Dans le cadre du copiage de formes complexes, nous avons présenté le processus que nous avons développé au laboratoire et l’avons comparé à la méthode classique de Reverse Engineering. Les résultats réels et simulés montrent que le copiage direct est plus performant en termes de fidélité à la forme et également beaucoup plus rapide. L’étape fastidieuse de reconstruction de surfaces, qui tend à lisser les formes, gommant les changements de courbure prononcés, est évitée. Nous souhaitons maintenant valider l’approche dans le cas d’un usinage à 5 axes positionnés. Cela permettrait d’intégrer le découpage topologique et technologique afin de déterminer la meilleure orientation de l’outil pour chaque point du nuage et d’éviter le démontage de la pièce. Cependant, des écarts géométriques devraient apparaître aux raccordements entre zones, notamment à cause des défauts géométriques de la machine.

Références

- Breteau P., Thiébaud F., Bourdet P., Lartigue C., 2006 Towards an approach for rapid copying of free-form surfaces in 5-axis machining, 6th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering
- Feng H.Y., Teng Z., 2005 Iso-planar piecewise linear NC tool path generation from discrete measured data points, *Computer-Aided Design*, 37, 55-64
- Jerard, R., Hussaini, S., Drysdale, R., Schaudt B. 1989 Approximate methods for simulation and verification of numerically controlled machining programs. *The Visual Computer*, 5, 329-348
- Lin, A.C., Liu, H-T. 1998 Automatic generation of NC cutter path from massive data points. *Computer Aided Design*, 33(1), 77-90
- Meek D.S., Walton D.J., 2000 On surface normal and Gaussian curvature approximations given data sampled from a smooth surface, *Computer Aided Geometric Design*, 17, 521-543.
- Osty G., Contri A., Duc E., 2000 Free-form copying from point clouds; A tool-path calculation method using B-Spline interpolation, *RCFAO, Rapid production*, 367-382
- Park J.C., Shin H., Choi B.K., 2006, Elliptic Gabriel graph for finding neighbors in a point set and its application to normal vector estimation, *Computer-Aided Design*, 38(6), 619-626
- Suzuki, H., Kuroda Y., Sakamoto M., Haramaki S., Van Brussel H., 1991 Development of the CAD/CAM System based on parallel processing and inverse offset method. *Transputing’91 Proceeding of the world Transputer user Group (WOTUG) conference*.
- Varady T., Martin R., Coxt J., 1997 Reverse engineering of geometric models- an introduction, *Computer Aided Design*, 29(4)