

Stratégies d'usinage et productivité en fraisage des surfaces complexes

Christophe Tournier* & Emmanuel Duc**

* Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée
Ecole Normale Supérieure de CACHAN, 61 av du Pdt Wilson 94235 Cachan Cedex
tournier@lurpa.ens-cachan.fr

**Laboratoire de Recherches et Applications en Mécanique Avancée – IFMA & UBP
IFMA Campus de Clermont-Ferrand – Les Cézeaux BP 265 63175 AUBIERE Cedex
Emmanuel.duc@ifma.fr

Résumé :

Le processus de réalisation des moules et des matrices a largement été modifié par l'utilisation de nouvelles techniques comme l'usinage à grande vitesse et l'interpolation polynomiale. Son optimisation impose une intégration complète entre la FAO, la commande numérique et l'usinage de manière à tenir compte au mieux de la performance dynamique de la machine utilisée. Pour illustrer ce problème, nous étudions dans cette communication l'influence du choix de la stratégie d'usinage et du mode d'interpolation sur la qualité et le temps d'usinage. Ainsi, nous comparons la stratégie d'usinage à hauteur de crête constante qui optimise la couverture de la surface, à la stratégie d'usinage classique par plans parallèles et l'interpolation polynomiale, qui rend continue C2 les trajets d'usinage à l'interpolation linéaire usuelle.

L'analyse des longueurs de trajets, du temps d'usinage et des vitesses moyennes réelles de parcours permet de définir une classification d'emploi en fonction de la forme géométrique de la trajectoire.

Abstract :

The manufacturing process of molds and dies has been largely modified by the use of new techniques like high-speed machining and polynomial interpolation. Its optimization imposes a complete integration between CAM, numerical controller and machining to take best account of the dynamic performance of the machine used. To illustrate this problem, we study in this communication the influence of the choice of the machining strategy and the type of interpolation over quality and machining time. Thus, we compare the constant scallop height machining strategy which optimizes surface covering, with the traditional machining strategy using parallel planes and the polynomial interpolation, which returns continuous C2 tool paths to the usual linear interpolation.

The analysis of tool path lengths, the machining time and the tool real mean speed along the path, makes it possible to define a classification of employment according to the geometrical form of the tool path.

Mots-clefs : surface complexe ; hauteur de crête ; interpolation de trajectoires d'usinage ; UGV

1 Introduction

L'usinage des pièces de forme gauche comme les moules et matrices est réalisé en fraisage par une succession de passes juxtaposées selon des critères de tolérance de flèche et de hauteur de crête (Choi *et al* 1998). L'objectif est de minimiser le temps d'usinage tout en garantissant un niveau de qualité attendu sur les pièces. Pour cela, il est nécessaire de choisir les stratégies d'usinage optimales vis à vis des performances et du comportement du moyen de fabrication. L'usinage à grande vitesse impose une prise en compte globale du processus lors du calcul de la trajectoire. Les stratégies usuelles sont remises en causes. Avec des stratégies de guidage de l'outil selon des plans parallèles ou selon les courbes isoparamétriques des surfaces, nous

sommes seulement capables de maîtriser la hauteur de crête maximum engendrée par chaque trajet. Les variations de l'orientation de la normale à la surface le long du trajet de l'outil provoquent un resserrement des passes successives (Figure 1) et la surface couverte par l'outil à chaque passe n'est pas maximale donc le temps d'usinage n'est pas minimum (Lartigue *et al* 1999). De plus, le sillon laissé par l'outil n'est pas homogène tout au long de la surface, ce qui peut induire des difficultés de polissage.

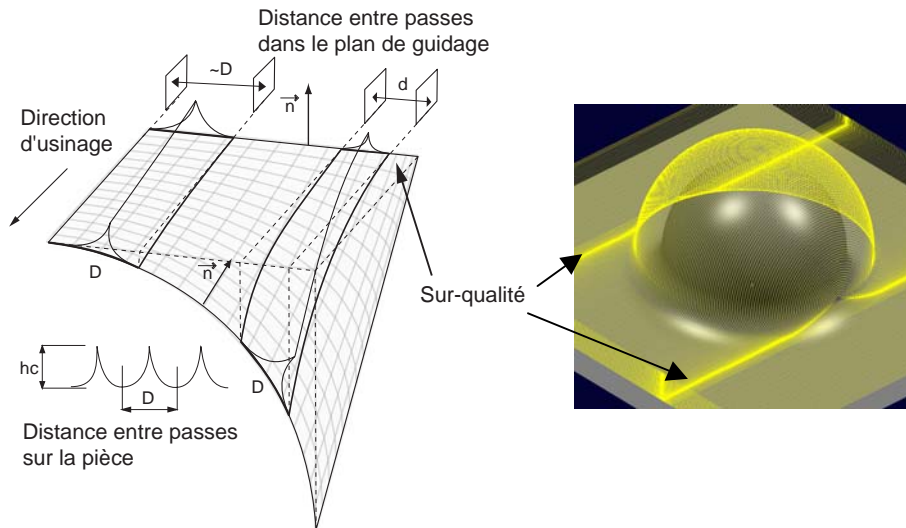


FIG. 1 – Resserrement des passes en usinage selon des plans parallèles

Afin d'augmenter la qualité et la rapidité de l'usinage, le Lurpa a développé une méthode de calcul de trajets dits à hauteur de crête constante entre deux passes consécutives (Tournier *et al* 2002). A partir d'un trajet initial, le trajet isocrête suivant est celui qui engendre une ligne de crête dont la distance à la surface nominale est constante. Cette stratégie améliore la qualité car elle génère une répartition très homogène des crêtes laissées par l'outil lors de l'usinage. Elle minimise également le nombre de passes pour des spécifications géométriques de défaut de forme et d'état de surface données. D'un point de vue purement géométrique, cette stratégie permet d'optimiser la surface couverte par l'outil (Suresh *et al* 1994). Elle devrait donc permettre de minimiser le temps d'usinage.

Dans la littérature, la génération de trajectoires en fraisage à 3 axes avec outil hémisphérique suppose la résolution de deux problèmes : la planification et le calcul effectif de la trajectoire. On définit déjà la direction générale de balayage puis on procède au calcul de l'ensemble des positions de l'outil juste nécessaire au respect du niveau de qualité attendu (Dragomatz *et al* 1997). La stratégie d'usinage isocrête impose de traiter les deux problèmes en même temps, puisque le calcul est conduit de proche en proche. Les méthodes proposées dans la littérature sont très similaires (Suresh *et al* 1994), (Lin *et al* 1996), (Sarma *et al* 1997). Elles résolvent le problème dans l'espace paramétrique des surfaces en effectuant certaines approximations pour résoudre des problèmes plans plus simples.

Nous proposons une résolution de ce problème sans approximation, à partir d'une modélisation surfacique de la trajectoire, grâce à la notion de surface d'usinage (Tournier 2001) (Tournier *et al* 2002). Considérons deux trajets adjacents suivis par le centre de l'outil. Durant le mouvement, ils génèrent, chacun une surface enveloppe, sous la forme d'une surface tuyau de rayon égal au rayon de l'outil. Leur intersection produit la crête engendrée par les deux trajets. Dans le cas d'un usinage isocrête, cette courbe intersection appartient à la surface offset de

distance égale à la hauteur de crête, nommée isocrête. Pratiquement, le problème géométrique revient ainsi à calculer des courbes d'intersection entre les surfaces tuyaux et la surface isocrête.

Nous proposons d'évaluer les gains obtenus lors d'usinages réels à hauteur de crête constante par rapport à la stratégie de guidage selon des plans parallèles. En effet, le temps d'usinage effectif dépend des performances dynamiques de la machine outil employée. Il dépend des caractéristiques de la machine telles que l'accélération et sa dérivée mais également du type de pilotage de l'outil utilisé par la commande numérique. On distingue deux types d'interpolation possibles sur les directeurs de commandes numériques modernes, l'interpolation linéaire, qui consiste à approcher les trajets complexes par une ligne brisée, et l'interpolation polynomiale (Duc *et al* 2001). Dans ce cas, la courbe polynomiale est calculée soit par le logiciel de FAO lors de la génération des trajectoires sous la forme de Bspline, soit par le DCN en temps réel à partir d'un trajet décrit en interpolation linéaire.

Le problème est donc de trouver la stratégie d'usinage et le format d'interpolation qui permettent d'optimiser le processus globalement. On cherche à minimiser le temps d'usinage tout en garantissant le niveau de qualité perçue requis. Il s'agit à la fois de la résolution du problème géométrique de la satisfaction du niveau de qualité et de la résolution du problème dynamique de la minimisation du temps d'usinage, c'est à dire de l'utilisation de la machine au meilleur de sa performance. L'apport réside dans la prise en compte des deux problématiques.

2 Mise en oeuvre des essais

Les essais portent sur la comparaison des deux stratégies d'usinage retenues en fraisage à trois axes ainsi que sur trois types de pilotage de l'outil par la commande numérique : interpolation linéaire, interpolation polynomiale dite «en temps réel», interpolation polynomiale dite «native ». Nous étudions l'usinage d'une famille de surfaces issues de la déformation du raccordement en tangence entre une demi sphère et un plan (figure 2). Cette surface présente une grande variation de l'orientation de la normale à la surface. Nous extrayons six surfaces, la première étant proche du plan (A75h10) et la dernière proche de la demi sphère (A05h10). La pièce est usinée par un balayage, avec un outil hémisphérique de rayon égal à 5 mm et une vitesse d'avance programmée de 4000 mm/min. La hauteur de crête programmée est de 10 μm .

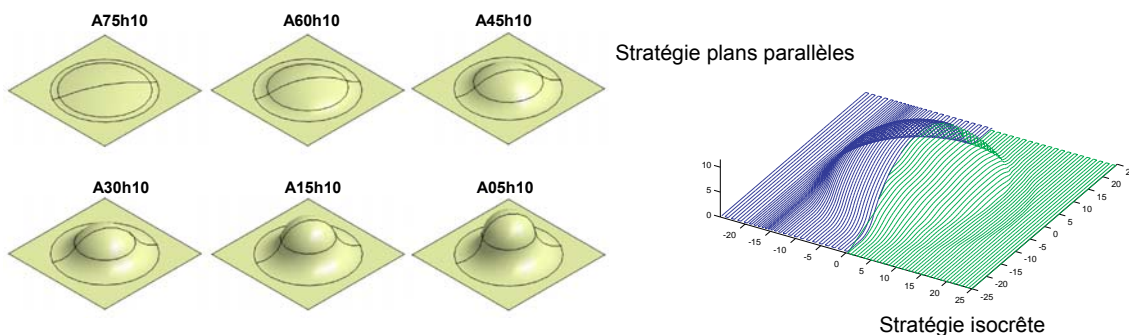


FIG. 2 – Surfaces d'essais

3 Analyse des résultats

En termes d'aspect visuel, nous constatons que l'usinage isocrête élimine les resserrement des passes qui produisent de la sur qualité (figure 2).

En étudiant les temps d'usinage, On observe que pour les surfaces relativement tendues avec des variations de normale faibles, la stratégie d'usinage par plans parallèles est plus rapide que la stratégie à hauteur de crête constante avec un gain de temps pouvant aller jusqu'à 25% en

interpolation linéaire. Par contre, pour les surfaces avec des courbures plus prononcées et donc des variations d'orientation de normale plus importantes, la stratégie à hauteur de crête constante est plus rapide avec des gains de temps d'environ 20% pour l'interpolation polynomiale native.

Afin de comprendre le comportement des deux stratégies plus en détail, nous avons calculé la vitesse d'avance réelle moyenne dans chaque cas : stratégie d'usinage isocrête en foncé et stratégie d'usinage en plan parallèle en clair (figure 3). Les résultats montrent que la vitesse d'avance réelle est inférieure à la vitesse d'avance programmée et dépend de la forme de la surface usinée représentée figure 2. Globalement, le temps d'usinage dépend de la longueur du trajet et de la vitesse moyenne effective. La longueur du trajet est diminuée en usinage iso-crête, car la couverture est meilleure, alors que la vitesse est plus grande en plan parallèle car le nombre d'axes sollicités est plus faible. Plus la surface présente une faible évolution de courbure, plus la diminution de longueur de trajet est grande. Le mode d'interpolation joue aussi un rôle important, car il modifie la vitesse moyenne effective de parcours. Ainsi le temps d'usinage pour la stratégie isocrête devient plus favorable quand le rapport des vitesses d'avance ne suffit plus à corriger le rapport des distances à parcourir.

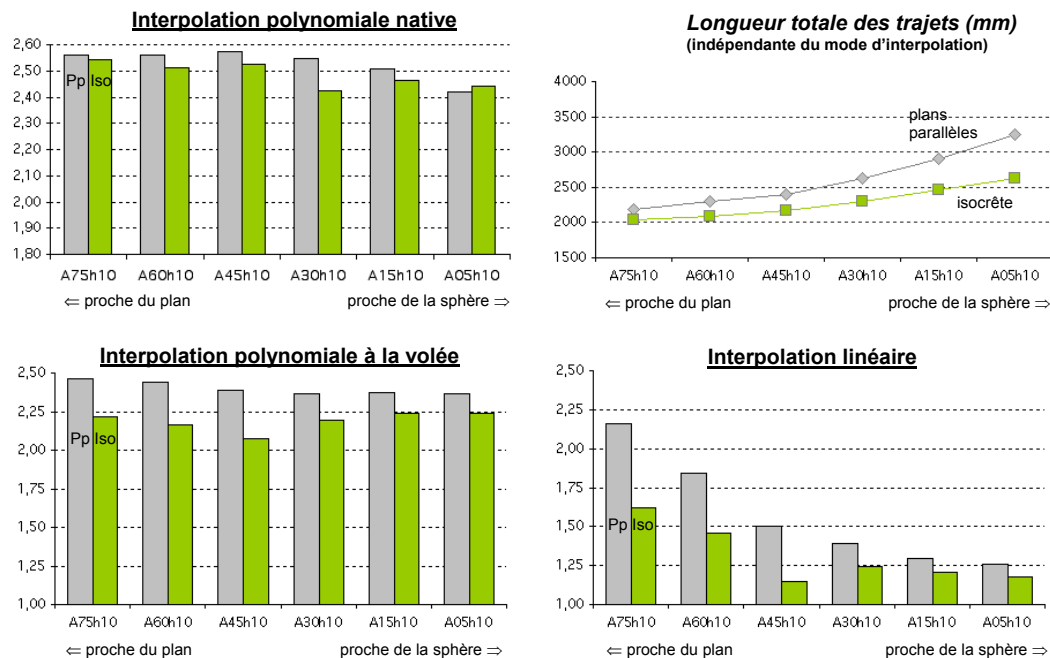


FIG. 3 – Comparaison des vitesses d'avance moyennes réelles et de la longueur des trajets

4 Etude des vitesses d'avance effectives

Pour une stratégie donnée, la différence entre les vitesses d'avance entre l'interpolation polynomiale et l'interpolation linéaire peut provenir de la géométrie des trajets. Nous avons partagé les trajectoires en quatre type de trajets caractéristiques : le trajet rectiligne, le trajet plan horizontal, le trajet plan vertical et le trajet quelconque tridimensionnel, relevé la vitesse d'avance effective. Le critère de séparation des différents types de trajet est basé sur le rapport entre la longueur, la hauteur et la largeur des volumes associés aux trajets (figure 4). Les trajets de chaque usinage sont alors répartis dans chaque catégorie.

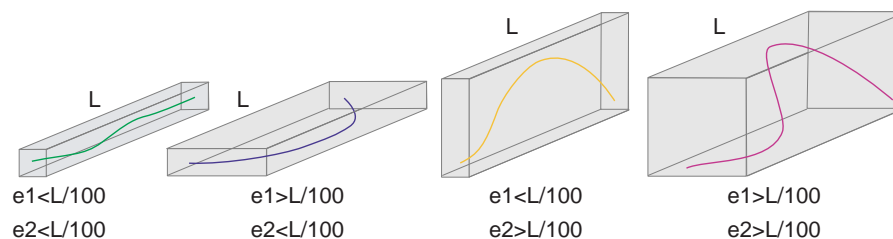


FIG. 4 – Typologie des trajets

Nous constatons que la vitesse moyenne effective est maximum pour les trajets rectilignes et minimum pour les trajets tridimensionnels, pour un type d'interpolation donné. En effet, les trajets non rectilignes présentent des variations importantes du rayon de courbure, entraînant une importante diminution de la longueur des arcs élémentaires de trajectoires, qui provoquent des ralentissements si le temps de préparation de bloc est trop long. L'interpolation polynomiale produit des trajets plus longs, qui laissent plus de temps pour la préparation du bloc suivant (Valette *et al* 2000). Les petits rayons de courbure produisent aussi des ralentissements du fait de l'accélération maximale des axes de déplacement. C'est le cas lorsque l'outil passe de la partie plane à la partie torique, et ensuite à la partie sphérique.

Sur la figure 5, nous représentons la composition de chacun des usinages programmés (figure 5). Globalement, la stratégie en plans parallèles génère des trajets rectilignes et horizontaux et la stratégie isocrête des trajets des quatre types. Ceci explique donc la différence observée sur les vitesses d'avance effectives moyennes (figure 3). Pour la stratégie isocrête, la répartition des différents types de trajets est en accord avec les comportements observés sur les vitesses d'avance effectives : moins il y a de trajets rectilignes, plus la vitesse moyenne est faible. Le cas des usinages *A60iso10* et *A45iso10* est intéressant car le trajet initial de leur génération n'est pas le même que pour les autres usinages isocrêtes. Ceux-ci ont été générés à partir du milieu de la pièce au lieu du bord plan de la pièce. Ils ne possèdent donc que très peu de trajets rectilignes par rapport aux autres usinages isocrêtes mais plus de trajets horizontaux. Nous pouvons donc en conclure qu'avec une même stratégie isocrête et pour une même géométrie, le temps d'usinage résultant n'est pas constant selon le choix du trajet initial.

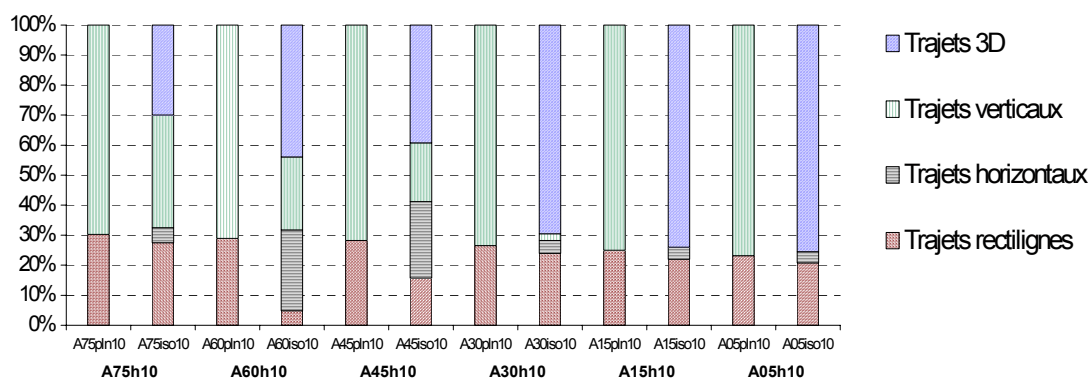


FIG. 5 – Nature des trajets pour chaque usinage

5 Conclusion

Nos travaux portent sur l'étude de la stratégie d'usinage optimale et du mode d'interpolation en fonction de la forme de la surface à réaliser. Nous avons étudié une famille de surfaces présentant des variations de courbure. L'optimisation passe par la recherche d'un compromis entre la longueur de la trajectoire fonction de la stratégie d'usinage et la vitesse moyenne de parcours tributaire du format d'interpolation et de la performance de la machine.

Nous montrons ainsi, que la stratégie isocrête couplée à l'interpolation polynomiale native apparaît comme la solution optimale pour minimiser le temps d'usinage. Cette association obtient les meilleurs résultats car la commande numérique parvient à maintenir une vitesse d'avance soutenue quelle que soit la géométrie du trajet. Pour les autres types d'interpolation et selon la géométrie des pièces à usiner, la stratégie d'usinage à hauteur de crête constante n'est pas toujours plus rapide que le guidage par plans parallèles. La stratégie isocrête génère plus de trajets de type tridimensionnel qui produisent une vitesse d'avance effective plus faible.

L'utilisation d'une machine d'usinage à grande vitesse, à moindre coût pour un niveau de qualité donné, suppose la prise en compte globale du système d'usinage dès le calcul de la trajectoire, et non plus géométrique lors du calcul de la trajectoire et dynamique pendant le suivi de celle-ci.

Nous souhaitons poursuivre cette étude, en développant une méthode d'usinage isocrête à 5 axes, à l'image de ce que nous avons présenté pour l'usinage à 3 axes. La faible performance dynamique des axes rotatifs influe nettement sur le comportement de l'usinage et la vitesse moyenne effective de parcours. Le calcul d'un parcours d'usinage qui assure le meilleur compromis entre la longueur de la trajectoire et la vitesse moyenne de parcours devient critique dans ce cas.

Références

- Choi, B. , Jerard, R., *Sculptured Surface Machining - Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers, 1998
- Dragomatz D., Mann S., *A classified bibliography of literature on NC milling path generation*, Computer Aided Design, vol. 29, No. 3, pp. 239-247, 1997.
- Duc, E., Lartigue, C., Laporte, S., *Assessment of the description format of tool trajectories in 3-axis HSM of sculptured surfaces - 3^{ème} congrès international sur la coupe des métaux et l'usinage à grande vitesse - Metz*, juin 2001.
- Lartigue, C., Duc E., Tournier C., *Machining of free-form surfaces and geometrical specifications*, IMechE, *Journal of Engineering Manufacture*, vol 213, pp 21-27, 1999.
- Lin, R-S., Koren, Y., *Efficient tool-path planning for machining free-form surfaces*, *Journal of Engineering for Industry*, vol. 118, february 1996.
- Sarma, R., Dutta, D., *The Geometry and Generation of NC Tool Paths*, *Journal of Mechanical Design*, vol. 119, 1997.
- Suresh, K., Yang, D.C.H, *Constant scallop-height machining of free-form surfaces*, *Journal of Engineering for Industry*, vol. 116, 1994.
- Tournier, C., Duc, E. *A surface based approach for constant scallop height tool path generation*, *The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.19, pp 318-324, 2002.
- Tournier, C., *Contribution à la conception des formes complexes : la surface d'usinage en fraissage à 5axes isocrêtes*, *Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan*, 2001.
- Valette, L., Duc, E., Lartigue, C. *A method for computation and assessment of NC toolpaths in free-form curve format*, *Int. Seminar on Improving Machine Tool performance*, La baule (France), 3-5 Juillet 2000.