
Aide au Choix des Stratégies d'Usinage. Etude de l'état de surface

QUINSAT Yann, SABOURIN Laurent, GOGU Grigore
LaRAMA. Université Blaise Pascal/IFMA

IFMA Campus de CLERMONT-FERRAND/Les Cézéaux BP 265
63175 Aubière Cedex France

Quinsat@ifma.fr

RÉSUMÉ. Les logiciels de F.A.O. actuels permettent de gérer un grand nombre de modes de génération de trajectoires basés sur la géométrie de la pièce à réaliser. Il existe donc un grand nombre de stratégies d'usinage possibles pour une même forme. Ce choix reste pour l'instant du domaine de l'expert. Effectivement il n'existe pas actuellement de règles précises permettant un choix automatique d'une stratégie d'usinage à partir de l'analyse des spécifications de la pièce et du modèle numérique. L'objectif des travaux présentés est de fournir un outil d'aide au choix des stratégies d'usinage pour la réalisation de pièces de formes complexes. L'influence de la trajectoire de l'outil sur la qualité finale de la surface en fonction des caractéristiques intrinsèques de la pièce a été étudié. Des essais ont été menés afin de caractériser cette influence sur l'état de surface généré par l'outil.

ABSTRACT. At present, CAM software allows us to manage various types of tool-path generation based on the geometry of the surface we have to work with. Hence, there are a lot of possible machining strategies for the same shape. Nevertheless the choice of a machining strategy remains an expert field. Indeed there are no precise rules allowing the automatic implementation of a machining strategy from the analysis of the numerical model of a part and the performance specification from the design department. The objective of this research is to provide an assistance tool that enables us to determine the machining strategy for sculptured parts. The influence of tool-path on the final quality according to the intrinsic geometrical characteristic of sculptured parts was studied. Experiments were carried out in order to characterise this influence on surface roughness generated by the tool.

MOTS-CLÉS : Stratégie d'usinage, Trajectoire outil, Etat de surface, Finition, Formes complexes.
KEYWORDS: Machining Strategy, Tool-path, Roughness, Finishing Process, Sculptured Parts.

1. Introduction

Dans le cadre de la réalisation de pièces de géométrie complexe en trois axes (moule de fonderie, injection plastique, matrice de forge, emboutissage) les logiciels de F.A.O. offrent actuellement un large éventail de typologies d'opérations associés à des générateurs de trajectoires d'usinage de plus en plus performants. Toutefois il n'existe pas encore aujourd'hui de guide méthodologique permettant de réaliser un choix optimisé du processus d'usinage (ébauche, finition) et le réglage des différents paramètres des générateurs de trajectoires. L'objectif du travail de recherche entrepris est de fournir des outils d'aide au choix de l'application de stratégie d'usinage. Dans le cadre de ces travaux il apparaît nécessaire de définir précisément le terme de stratégie d'usinage. En effet, actuellement cette notion est très souvent utilisée (Hatna 1998) mais sa définition ainsi que les paramètres qu'elle englobe, restent flous. Les problématiques de choix de stratégie d'usinage sont différentes d'une opération à une autre comme nous le décrirons. Nous avons décidé de nous focaliser sur le choix de stratégie d'usinage en finition car cette opération est celle qui apporte la qualité finale de la pièce et nécessite le plus de savoir-faire. L'objectif de ces travaux est de fournir une méthodologie de choix de stratégie d'usinage en finition pour des critères d'état de surface.

2. Stratégie d'usinage : définition et description

La première partie de cet article a pour but de préciser l'ensemble des termes et notions associés à la mise en place d'une définition de stratégie d'usinage.

2.1 Définition

2.1.1 Terminologie

En complément à l'ensemble des définitions usuelles en gamme de fabrication (Gama 1990), nous introduisons une définition de la stratégie d'usinage.

Stratégie d'usinage : Une stratégie d'usinage est une méthodologie utilisée pour générer une série d'opérations, dans le but de réaliser une forme donnée. Elle permet d'associer un processus d'usinage à une entité d'usinage, c'est-à-dire un ensemble d'opérations comprenant la définition des outils, des conditions de coupe et des trajets d'usinage.

Afin de préciser l'ensemble des paramètres intervenant dans l'application d'une stratégie d'usinage, nous développons maintenant la notion de stratégie d'usinage de finition des pièces de formes complexes.

2.1.2 Stratégie d'usinage de finition

Les modes de balayage d'une surface en finition, disponibles dans les logiciels de F.A.O., sont nombreux (z-level, plans parallèles, iso-paramétrique) et beaucoup de travaux de recherche sont effectués dans ce domaine pour les améliorer ou en créer de nouveaux (Park 2000, Park 2003, Tournier 2002, Kim 2002). Le but de l'opération de finition est de réaliser une surface respectant les contraintes du bureau d'étude. Contrairement à l'opération d'ébauche, le temps de réalisation en finition n'est pas prépondérant sur le respect des contraintes imposées sur la surface.

Une stratégie d'usinage de finition est une méthodologie utilisée pour générer une opération dans le but de réaliser une entité géométrique dans sa forme finale. Le choix d'une stratégie d'usinage de finition est un problème sous contraintes associés au défaut de forme et à l'état de surface. Elle permet de caractériser l'outil, les conditions de coupe et les paramètres de réglage du générateur de trajectoires.

Les trajets sont réalisés à partir d'une surface d'usinage S_M qui comporte toutes les informations nécessaires pour leur construction. Dans le cas de surfaces nominales S_D ne posant pas de problème d'interférences, elle peut être définie par $S_M(u,v) = S_D(u,v) + R.N_D$ (Tournier 2002). Avec N_D la normale à S_D au point $S_D(u,v)$.

A partir de cette surface, la construction des trajets nécessite donc la connaissance d'une direction de balayage, d'un pas transversal (respect d'une hauteur de crête) et d'un pas longitudinal (précision de la génération de trajectoires).

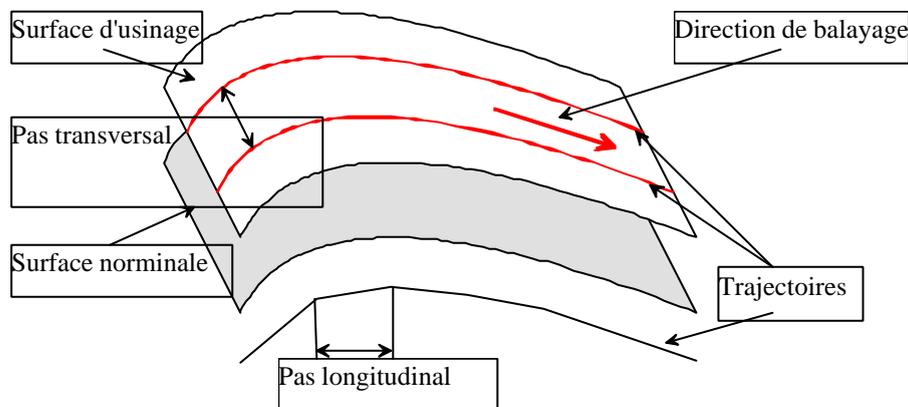


Fig. 1. Description d'une stratégie de finition

2.2 Lien entre stratégie d'usinage et géométrie

Les pièces de formes complexes sont définies à partir de surfaces paramétrées. Ces surfaces ont une orientation et des courbures qui dépendent du point considéré. Elles peuvent posséder de plus des discontinuités d'ordre n . D'un point de vue fonctionnel, les spécifications normalisées associées à ces surfaces sont de quatre ordres (dimensionnelles, défaut de forme (ISO 1101), état de surface (ISO 1302), aspect visuel (ISO 8785)). Nous présentons dans ce paragraphe l'influence de différents paramètres d'usinage sur l'adéquation d'une stratégie d'usinage.

2.2.1. Influence sur le temps de réalisation

Dans le cas de la finition d'une surface complexe, les temps improductifs comme le temps de changement d'outil sont négligeables en comparaison du temps d'usinage. Ce temps dépend directement de la vitesse d'avance. Or celle-ci varie tout au long de la trajectoire et elle est difficilement prévisible (Monreal 2003). En effet, les actionneurs de la machine outil ralentissent ou accélèrent pour permettre à l'outil de respecter les consignes de position. Un choix judicieux d'une direction de balayage en fonction de la géométrie (évitant les changements brusques de direction) peut permettre une réduction du temps d'usinage effectif.

2.2.2. Influence sur l'état de surface et le défaut de forme

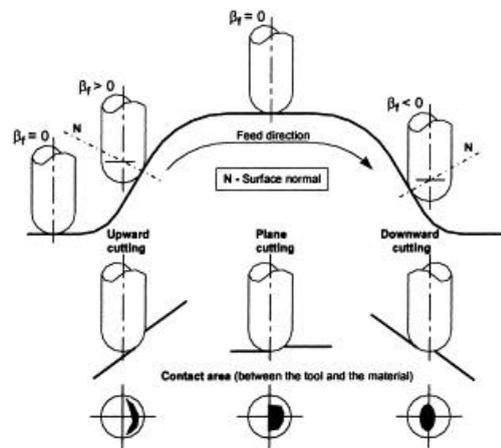


Fig. 2. Position de la zone de contact (Baptista 2000)

Lors des différents trajets d'usinage, la position et l'étendue de la surface de contact entre l'outil et la pièce varient (Baptista 2000). Cette position (Fig. 2) dépend,

pour un point considéré, de l'orientation de la surface au point de contact et du sens d'usinage (direction de balayage). Cette variation influence :

- La vitesse de coupe effective de l'outil. Plus le point est situé près du centre de l'outil, plus la vitesse de coupe est faible, et inversement.
- Les efforts de coupe. (Lim 1997). Dans certaines zones de la pièce (rayon de raccordement), la prise de passe peut augmenter rapidement même pour des profondeurs de passe faibles ; il est donc important de connaître les efforts de coupe afin de pouvoir prédire une flexion éventuelle de l'outil et donc le défaut de forme généré.

2.2.3. Influence sur la hauteur de crête

La hauteur de crête se calcule à partir de la définition de la surface à réaliser et de la trajectoire de deux trajets consécutifs (Lartigue 2001). Elle dépend donc de la géométrie et de la stratégie d'usinage choisie.

Dans le but de proposer une méthode d'aide au choix de stratégie d'usinage pour une opération de finition, et de par le nombre important de paramètres influents et non indépendants, nous avons volontairement restreint ceux-ci pour essayer de mettre en place des modèles associatifs. Nous privilégions tout d'abord le critère d'état de surface par rapport au défaut de forme. En effet, dans le cadre de la finition, les hauteurs de crête sont de très faible amplitude, de même que la distance entre deux trajets consécutifs. Ce défaut est donc du même ordre que la rugosité.

3. Etat de surface en finition par outil hémisphérique

Parmi l'ensemble des paramètres influant sur l'état de surface et précisés auparavant, nous constatons que les paramètres prépondérants sont :

- L'orientation de l'axe outil par rapport à la surface.
- La direction de l'avance ou sens de balayage.

L'idée retenue est de pouvoir caractériser l'influence de ces deux paramètres prépondérants en fonction d'un état de surface donné. Différentes études sur la caractérisation de l'influence de l'orientation d'un outil à bout hémisphérique ont été menées. Certaines ont un caractère plus expérimental (Ko 2001, Kang 2001) et sont plus attachées à observer l'usure de l'outil que l'état de surface final. D'autres études (Bouzakis 2003) analysent la trace laissée par un outil pour différentes inclinaisons et proposent un modèle de prédiction de l'état de surface, mais les critères d'état de surface utilisés sont uniquement linéaires et non surfaciques. Nous présentons nos modèles de simulation théoriques, les premiers plans d'expérience et essais réalisés, ainsi que nos premières conclusions. Dans un but de simplification, nous nous sommes limités, pour l'instant, à la caractérisation du paramètre d'état de surface sur une surface plane. Nous considérons que localement la surface usinée peut être approximée par le plan tangent au point considéré.

3.1 Calcul de la trace produite par un outil à bout hémisphérique

3.1.1 Définition

Nous définissons $\mathfrak{R}_{\text{part}}=(O_p, i_p, j_p, k_p)$, le repère lié à la pièce tel que :

- Le plan à réaliser est orthogonal à k_p .
- Les trajectoires de l'outil sont des droites parallèles à i_p .

La vitesse de rotation de l'outil est donnée par $W=\Omega.k_o$. Nous définissons un repère associé à l'outil $\mathfrak{R}_{\text{tool}}=(O, i_o, j_o, k_o)$, avec O le centre de l'outil. Les vecteurs directeurs sont définis par la relation :

$$\begin{pmatrix} i_o \\ j_o \\ k_o \end{pmatrix} = R_{op} \cdot \begin{pmatrix} i_p \\ j_p \\ k_p \end{pmatrix}$$

Nous créons un repère sphérique $\mathfrak{R}_{\text{sphérique}}=(O, u_r, u_\varphi, u_\psi)$ avec ψ l'angle entre u_r et k_o , et θ l'angle dans le plan (i_o, j_o) . L'arête de coupe de notre outil peut se définir par $C(\psi)$. Nous définissons la courbe correspondant à une trajectoire i de l'outil. La position du centre de l'outil est déterminée par la fonction $T_i(t)$. La trajectoire est orientée selon le sens de déplacement de l'outil.

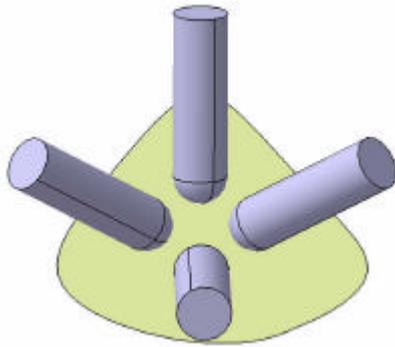


Fig. 3. Orientations possibles de l'outil pour une même direction d'avance

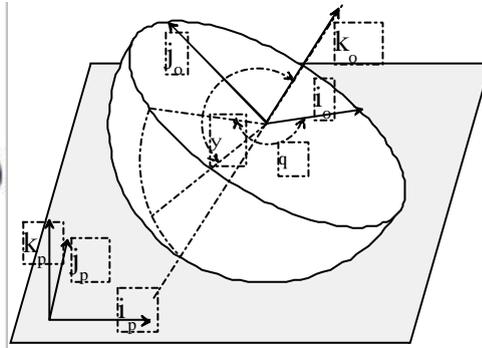


Fig. 4. Description des paramètres

3.1.2. Calcul de la trace de l'outil

Pour calculer la trace laissée par l'outil, il est nécessaire de connaître à chaque instant la position de l'arête de coupe dans le repère de la pièce et de calculer l'intersection de cette courbe avec l'ensemble des plans orthogonaux au déplacement.

Nous avons défini la position d'un point de l'arête de coupe dans le repère de l'outil par $\mathbf{OM}=C(\psi).\mathbf{u}(\psi)$. Dans le repère pièce nous obtenons :

$$\begin{pmatrix} (x-T_{ix}(t)) \\ (y-T_{iy}(t)) \\ (z-T_{iz}(t)) \end{pmatrix} = R_{op}^{-1}.C(\mathbf{y}). \begin{pmatrix} \sin \mathbf{y} . \cos \mathbf{q} \\ \sin \mathbf{y} . \sin \mathbf{q} \\ \cos \mathbf{y} \end{pmatrix}$$

Pour connaître l'ensemble des points intersections, il suffit de résoudre ce système non linéaire qui a pour inconnues (y,z,\mathbf{y}) pour différentes valeurs de (x,t) . L'angle θ étant défini par $\mathbf{q}=\mathbf{W}.t+\mathbf{q}_0$, nous obtenons ainsi un ensemble de triplet $E=\{(x,y,z)\}$. La trace finale laissée par l'outil correspond aux solutions qui, pour une même position dans le plan (x,y) tangent à la surface, ont l'altitude la plus faible.

$$Trace = \{(x, y, z) \in E, \forall (x_1, y_1, z_1) \in E \quad (x_1 = x) \ \& \ (y_1 = y) \Rightarrow z_1 \geq z\}$$

3.2. Simulation

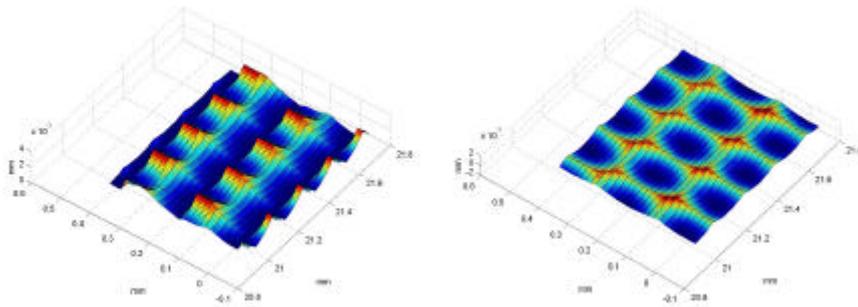


Fig. 5. a- $f_z=0.2\text{mm/dent}$ $p=0.2$ pente= 0° b-pente 15°

Nous avons implémenté ce calcul et représenté la trace laissée par l'outil pour différents pas transversaux, inclinaisons et avances de l'outil. Les résultats obtenus (Fig. 5) permettent de mettre en évidence l'influence prépondérante de l'avance (f_z) et du pas transversal (p). Nous constatons que l'amplitude des défauts de la surface (S_z) diminue (de $15\mu\text{m}$ à $6\mu\text{m}$) dès que l'outil est incliné (inclinaison longitudinale ou transversale). Par contre, un angle d'inclinaison supérieure à $\mathbf{a}=g(f_z,p,R)$ n'a plus d'influence sur l'amplitude et la forme de la trace laissée par l'outil ($S_z \gg 6\mu\text{m}$). Cet angle se calcule par $\cos(\mathbf{a})=L/R$. Avec $L=f_z$ ou $L=p$ selon que l'on considère une inclinaison longitudinale ou transversale.

Lors d'une inclinaison supérieure à cet angle limite α , le motif obtenu est une juxtaposition de calottes de sphère de rayon R égal à celui de l'outil. Ce motif dépend uniquement de l'avance par dent, du pas transversal et du rayon de l'outil. Il n'y a pas d'influence de la position de la zone de contact outil/pièce sur l'outil.

3.3. Expérimentation

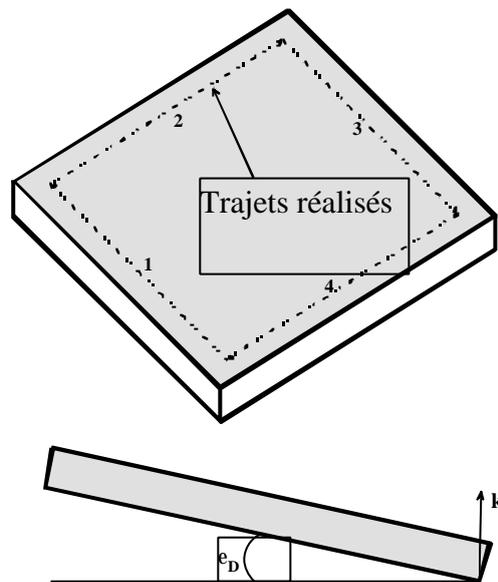


Fig. 6. Description des trajets outil utilisés

Afin de confronter ces résultats théoriques à une pièce réelle, nous avons réalisé une série de balayages sur des plans dont nous avons fait varier l'orientation par rapport à l'axe de l'outil (0° à 30°). Pour chacune d'elles, l'outil effectue un trajet carré qui permet d'étudier quatre orientations différentes. Ces essais ont été réalisés sur une machine d'usinage grande vitesse; les conditions d'expérimentation sont données au tableau 1.

Diamètre de l'outil	10 mm
Fréquence de rotation	18000 tr/mn
Vitesse d'avance	0.2 mm/dent et 0.3 mm/dent
Matière	AU4G

Tableau 1

Les surfaces obtenues (Fig 7) ont été relevées à l'aide d'un instrument de mesure optique (Wyko NT1100). Dans le cas d'une inclinaison nulle, l'état de surface est très médiocre et ne permet pas de mesure correcte. Pour une inclinaison de 5° et plus, nous retrouvons les mêmes motifs et la même amplitude de défaut que ceux calculés numériquement.

Les simulations obtenues et validées par notre expérimentation nous permettent d'avoir un modèle de prédiction de texture de surface. Ce modèle tend à montrer que pour des surfaces ayant une orientation comprise entre 0° et 30°, la direction d'usinage n'a pas d'influence sur la texture de la surface obtenue. Les paramètres influents sur l'état de surface sont alors uniquement la vitesse d'avance (f_z) et le pas transversal (p).

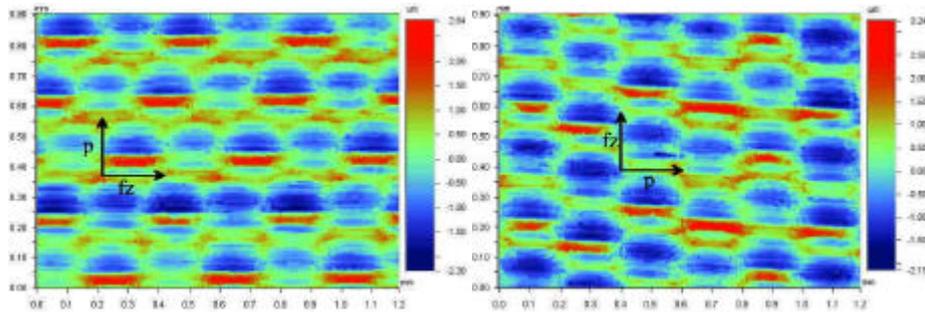


Fig. 7. Analyse des résultats $f_z=0.2\text{mm/dent}$ $p=0.2\text{mm}$ inclinaison 15° a-trajet 2 b-trajet 3

4. Choix d'une direction d'usinage

Nous nous plaçons dans le cas de la finition d'une surface ayant de faibles inclinaisons et de faibles courbures. Ces hypothèses nous permettent d'utiliser le modèle de prédiction défini auparavant. Dans un premier temps, nous supposons que les erreurs de la trajectoire programmée sont d'un ordre supérieur à la rugosité, et ne sont pas prises en compte. Pour une surface ayant de faibles courbures, nous considérons de plus que la vitesse d'avance est constante.

La stratégie d'usinage la plus performante est celle qui optimise le temps d'usinage tout en respectant les contraintes d'état de surface. Le temps total d'usinage se calcule par :

$$T_{tot} = \sum_{Nb_toolpath} \int \frac{dx}{V_f}$$

La diminution du temps d'usinage impose d'augmenter le taux d'enlèvement de matière ; or localement ce taux d'enlèvement de matière est proportionnel à $A=p.f_z$. Le

modèle mis en place montre que les motifs de surface obtenus ont une aire projetée égale à $p.f_z$. Dans le cas où les longueurs des trajets sont équivalentes, si ce facteur A est maximisé, alors le temps total sera diminué. Notre objectif est de choisir une direction d'usinage qui permet de maximiser le pas transversal (p) ainsi que l'avance par dent (f_z).

La contrainte d'état de surface exprimée par S_z correspond à la hauteur maximale de saillie pour la surface réalisée. Le modèle mis en place montre que les paramètres p et f_z agissent de façon indépendante sur cette différence de hauteur. Nous pouvons alors choisir l'avance la plus grande possible qui respecte ce critère d'état de surface (et les contraintes technologiques liées à l'outil).

Dans le cas d'un balayage d'une surface par plans parallèles (Park 2000), nous appelons p_l le pas transversal utilisé (défini en FAO) et p l'entre passe dans le plan de la surface (précédemment défini). L'influence du pas transversal p_l sur S_z dépend de l'orientation du plan tangent à la surface, de la courbure et de l'orientation des trajets sur cette surface (Fig 8). Dans le cas d'un plan incliné, pour un défaut S_z , p peut être maximisé pour respecter ce critère. Le pas transversal p_l sera maximal si la direction de balayage correspond au sens de la plus grande pente (si $\chi=90^\circ$). En effet, dans le plan Π (contenant l'axe de l'outil et orthogonal à la direction d'usinage), p_l est défini par $p_l=p.\cos(b)$. Pour $\chi=90^\circ$, $b=0$ et p_l est maximal.

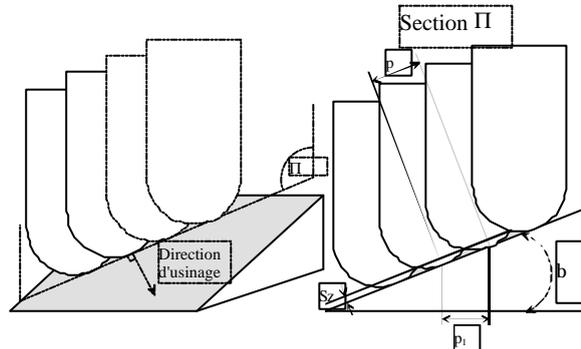


Fig. 8. Calcul de la hauteur de crête en fonction de la direction de balayage

Dans le cas d'une surface quelconque, l'objectif est de trouver la direction de balayage permettant d'avoir le pas transversal p_l le plus grand possible tout en respectant le critère d'état de surface S_z . Il suffit de calculer pour chacune des directions le pas transversal p pour respecter une hauteur de crête (Lartigue 2001). La direction choisie est celle qui maximise ce pas p_l .

5. Conclusions

La première partie de cet article est consacrée à la mise en place d'une définition de stratégie d'usinage et à une caractérisation la plus exhaustive possible des paramètres de description. Nous avons focalisé nos travaux sur le choix de stratégie de finition afin de mettre en évidence un couplage direct entre les spécifications géométriques (défaut de forme, état de surface), la description mathématique de la surface et les paramètres de description de la stratégie. Cette étude vise à élaborer une méthodologie d'aide au choix de stratégie d'usinage en finition.

La deuxième partie présente une simulation de la trace laissée par l'outil sur la pièce. Un plan d'expérience a été mené afin de confronter cette modélisation à une réalisation physique. Les résultats que nous avons obtenus nous permettent de définir les corrélations entre les paramètres de la stratégie et l'état de surface. Nous constatons que la texture de la surface obtenue dépend uniquement du pas transversal p et de la valeur de l'avance f_z .

De cette constatation, nous déduisons une première approche pour le choix d'une stratégie d'usinage. Cette méthode est basée sur la minimisation du temps de production par maximisation du pas transversal (défini au niveau de la FAO). Le critère d'état de surface retenu pour cette optimisation est surfacique.

Nous envisageons de compléter cette approche pour des critères d'état de surface qui prennent en compte les aspects technologiques de la surface (isotropie de texture, lubrification, glissement, etc.). L'objectif sera de choisir une stratégie d'usinage en fonction des applications spécifiques de la pièce usinée (matrice d'emboutissage, moule d'injection plastique, etc.).

6. Bibliographie

- Baptista, R., Antune Simões, J. F. "Three and five axis of sculptured surfaces". Journal of Materials Processing Technology, volume 103, pp. 398-403, (2000).
- Bouzakis, K.-D, Aichouh, P., Efstahiou, K. "Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with ball end tools", International Journal of Machine Tools & Manufacture, volume 43, pp. 499-514, (2003).
- Choi, B. K., Jerard, R. B. Sculptured surface machining theory and application. Kluwer Academic Publisher (1998).
- La Gamme Automatique en usinage. Edité par Groupe GAMA, Hermès, ISBN 2-86601-255-0, (1990).
- Hatna, A., Grieve, R. J., Broomhead, P. "Automatic CNC milling of pockets : geometric and technological issue". Computer Integrated Manufacturing Systeme, volume 11, number 4, pp. 309-330, (1998).

- Kang, M. C., Kim, K. K., Lee, D. W., Kim, J. S., Kim, N. K., "Characteristics of inclined Planes According to the Variations of the cutting direction in high-speed ball-end milling", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, volume 17, pp. 323-329,(2001).
- Kim, T., Sarma, S. E. "Toolpath generation along directions of maximum kinematic performance ; a first cut at machine-optimal paths". Computer Aided Design, volume 34, pp.453-468, (2002).
- Ko, T. J. , Kim, H. S., Lee, S. S., "Selection of the machining inclination angle in high-speed ball end milling", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vlume 17, pp. 163-170, (2001).
- Lartigue, C.,Thiebaut, F., Maekawa,T. "CNC tool path in terms of B-spline curve", Computer Aided Design 33, p307-319, (2001).
- Lee, K. "Generation of toolpath with selection of proper tools for roughing cutting process". Computer Aided Design volume 26 number 11, (1994).
- Lim, E. M., Menq, C.-H. "Integrated planning for precision machining of complex surfaces. Part 1 : Cutting-path and feed rate optimization. International of Machine Tools and Manufacture", volume 37, number 1, pp. 77-91, (1997).
- Monreal, M., Rodriguez, C. A. "Influence of tool path strategy on the cycle time of high speed milling", Computer-Aided Design, volume 35, pp. 395-401, (2003).
- Park, S. C., Choi, B. K. "Tool-path planning for direction-parallel aera milling", Computer Aided Design Volume 32 Number 1,pp. 17-25, (2000).
- Park, S. C. "Tool-path generation for z-constant contour machining", Computer Aided Design Volume 35 number 1,pp. 27-36, (2003).
- Sun, G., Sequin, C. H., Wright P. K. "Operation decomposition for freeform surface feature in process planning", Computer aided Design Volume 33,pp. 621-636, (2001).
- Tournier, C., Duc, E. "A surface based approach for constant scallop height". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, volume 19, pp. 318-324, (2002).