

Amélioration de la précision des formes obtenues en μ -SPIF par compensation de trajectoire d'outil

BONNARDOT Cédric^a, MALECOT Pierrick^b, THIBAUD Sébastien^c

- a. Institut FEMTO-ST, COMUE UBFC/CNRS-UMR6174/UFC/ENSMM/UTBM, Département de Mécanique Appliquée, Equipe PM2, Besançon + cedric.bonnardot@femto-st.fr
b. Institut FEMTO-ST, COMUE UBFC/CNRS-UMR6174/UFC/ENSMM/UTBM, Département de Mécanique Appliquée, Equipe PM2, Besançon + sebastien.thibaud@femto-st.fr
c. Institut FEMTO-ST, COMUE UBFC/CNRS-UMR6174/UFC/ENSMM/UTBM, Département de Mécanique Appliquée, Equipe PM2, Besançon + pierrick.malecot@femto-st.fr

Résumé :

L'objectif de cette communication est de proposer une technique visant à compenser les défauts de mise en forme résultant du procédé de micro-formage incrémental. La technique proposée consiste à définir des trajectoires d'outils paramétriques à l'aide de courbes B-splines. La trajectoire ainsi appliquée à la géométrie CAO est générée. Le micro formage d'une pièce s'effectue ensuite en utilisant cette trajectoire initiale. Après avoir numérisé la forme obtenue, une comparaison est faite entre les géométries obtenue et spécifiée. Un algorithme de compensation est ensuite appliqué pour générer une trajectoire optimisée prenant en compte les défauts de formage et de retour élastique. Après l'application de cette nouvelle trajectoire, la pièce est alors réalisée et l'intérêt de cette approche est démontré en comparant les géométries spécifiées, obtenues et optimisées.

Abstract :

The purpose of this communication is to propose a μ single point incremental forming technique to compensate defects of shape due to forming and springback. The proposed technique consists in defining parametric tool paths using B-splines curves. The tool path thus applied to the CAD geometry is generated. The forming of a part is then carried out using this initial trajectory. After digitizing the obtained shape, a comparison is made between the obtained and the specified geometries. A compensation algorithm is then applied to generate an optimized tool path that takes into account forming and springback defects. After applying this new trajectory, the part is then made and the interest of this approach is demonstrated by comparing the specified, obtained and optimized geometries.

Mots clés : Précision, Génération trajectoire outil, Compensation, B-Spline, Formage incrémental mono-point

1 Introduction

Le principe du micro formage incrémental mono point (μ -SPIF) consiste à déformer localement et de manière incrémentale une tôle de faible épaisseur à l'aide d'un outil hémisphérique (Fig. 1). L'avantage de ce procédé est de permettre la réalisation des pièces de formes complexes par le contrôle d'une

trajectoire de l'outil pouvant être générée à l'aide d'une machine à commande numérique. Cependant cette technique est très peu utilisée en faibles dimensions car la miniaturisation de ce procédé est encore un sujet complexe. Lorsque la taille de la pièce est amenée à de petites échelles, l'ensemble des paramètres régissant le procédé et le comportement du matériau ne se déduisent pas homothétiquement des paramètres à l'échelle initiale [1].

Le formage incrémental mono-point (SPIF) possède des limites de formabilité plus élevées en comparaison de l'emboutissage. Cependant afin de profiter des avantages de cette technique, il est important d'en comprendre les limites et surtout de comprendre les phénomènes régissant le procédé.

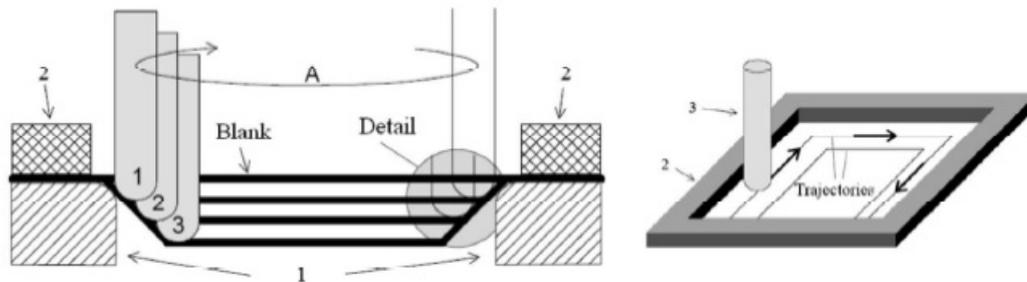


FIGURE 1 – Principe du procédé SPIF

La majorité des publications sur le procédé de formage incrémental mono-point ont assez peu mis l'accent sur le trajet de l'outil. Hirt et al.[2] ont proposé une méthode expérimentale où les parcours d'outils sont modifiés après avoir mesuré la première pièce produite et ses défauts. Skjoedt [3] propose une méthode similaire. Micari et al.[4] ont discuté de plusieurs méthodes afin d'améliorer la capacité du SPIF et ont conclu que les approches d'optimisation des parcours d'outils sont les plus prometteuses.

Par conséquent, la première section de cet article montre comment construire le chemin d'outil pour former une géométrie simple à l'aide de courbes B-Splines. L'étude se concentre non seulement sur les paramètres du parcours d'outil tels que l'incrément axial ou l'avance, mais également sur la forme même du parcours d'outil. La trajectoire de l'outil est ainsi projetée sur un modèle CAO simple et le formage de cette forme est réalisé. La pièce obtenue est comparée au modèle CAO à l'aide de l'algorithme proposé, un parcours d'outil optimisé est alors proposé. De plus, le parcours d'outil optimisé tient compte des effets de retour élastique et de la déformation résultante du trajet imposé. Après avoir obtenu cette nouvelle trajectoire, une nouvelle pièce est alors réalisée. On compare alors le modèle CAO avec la pièce obtenue et la pièce optimisée.

2 Courbes B-Splines

Le but de cette étude est de réaliser un parcours outil à l'aide de courbes paramétriques afin d'éliminer les discontinuités locales potentielles. Pour générer une forme ouverte nous devons générer $n + 1$ points de contrôle formant un polygone définissant la forme de l'objet dans l'espace. Ces $n + 1$ points de contrôle vont alors servir à former une courbe B-Spline définie par une combinaison linéaire de splines et telle que :

$$C(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,k}(t)P_i \quad (1)$$

Où $C(t)$ définit la position en tout point de la B-Spline, t représente la coordonnée curviligne des nœuds de la B-Spline, P_i sont les vecteurs composés des coordonnées spatiales des points de contrôle, $N_{i,k}(t)$

sont les fonctions de bases de la B-Spline définies par l'algorithme de Cox-de Boor où k est l'ordre de la courbe et avec $k = p + 1$ (p est le degré de la fonction de base) telle que :

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t_i \leq t < t_{i+1} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

et

$$N_{i,k}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+k+1} - t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k} - t}{t_{i+k} - t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t) \quad (3)$$

Pour cette étude, une trajectoire initialement hélicoïdale à support conique est générée et utilisée telle que représentée sur la Fig. 2.

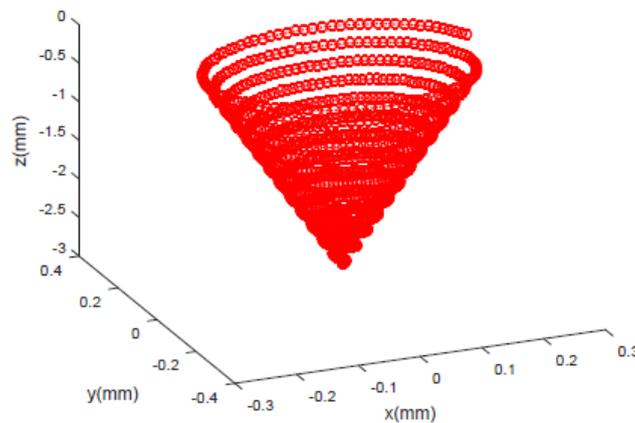


FIGURE 2 – Cône hélicoïdal

3 Méthode

3.1 Chemin projeté sur une surface

Après avoir créé un parcours d'outil à l'aide d'une B-Spline, celui-ci est alors inséré au barycentre du modèle CAO d'une pyramide à base carrée selon l'axe outil z (voir Figure 4(a)). La trajectoire initiale est alors projetée sur le modèle CAO. L'algorithme utilisé consiste en la détermination du point d'intersection entre les segments formant du point P_0 appartenant à l'axe de l'hélice et situé à la même altitude que le point P_1 défini comme le point le plus proche de la géométrie discrétisée par un maillage triangulaire (Fig. 3).

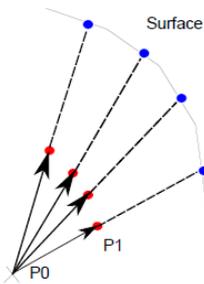


FIGURE 3 – Courbe projeter sur une surface

Le parcours d'outils ainsi généré consiste ainsi en la projection de la trajectoire conique hélicoïdale sur la surface maillée de la pièce (Fig 4(b)).

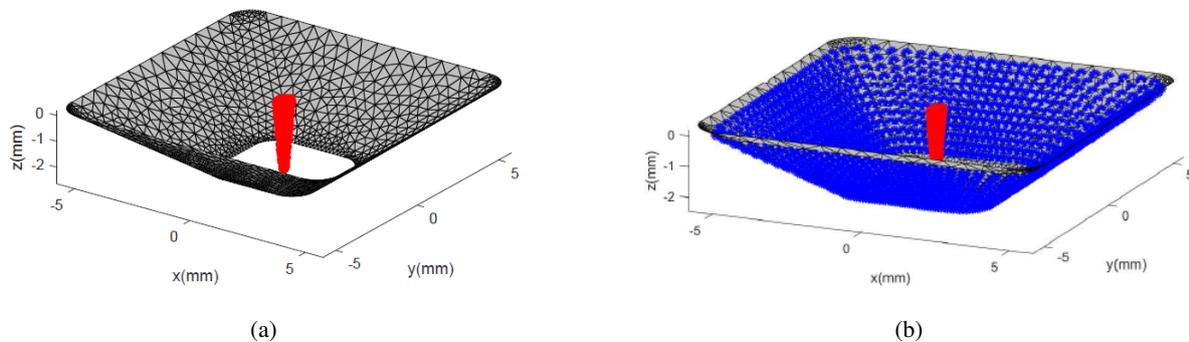


FIGURE 4 – Chemin projeté. (a) Modèle Théorique (b) Parcours Projeté

On réalise alors la pièce à l'aide du procédé μ -SPIF en utilisant cette trajectoire initiale. Afin de limiter les efforts du frottement, l'outil est mis en rotation et on applique une lubrification de type brouillard d'huile. La pièce est alors numérisée et comparée à la pièce théorique. On effectue pour cela un recalage de type best-fit pour comparer les écarts en terme de distance entre la CAO et la géométrie réalisée. Les écarts mesurés sont alors reportés sur la trajectoire initiale afin de compenser les erreurs de la trajectoire initiale. Pour cela, pour chaque point de la trajectoire B-Spline P_i , on recherche la position réelle de ce point, noté P'_i sur la géométrie et on détermine selon la direction de projection l'écart d_i constaté. La trajectoire initiale est alors modifiée en conséquence de cet écart le long du vecteur pour obtenir la trajectoire compensée telle que

$$\overrightarrow{P_0 P'_i} = \overrightarrow{P_0 P_i} + d_i \frac{\overrightarrow{P_0 P_i}}{\|\overrightarrow{P_0 P_i}\|} \quad (4)$$

Chaque point de la B-Spline est alors décaler selon cette projection afin de générer la trajectoire optimisée tout en conservant la continuité locale du parcours.

4 Résultats

La méthode de compensation est donc appliquée sur la réalisation d'une pièce pyramidale à section carrée. Des feuilles, d'épaisseur $210 \mu\text{m}$, en alliage de Cuivre-Fer (CuFe2) et en polypropylène (PP) sont considérées. On se focalise ici sur le PP car il dispose d'un comportement viscoélastique-viscoplastique menant à des variations des écarts d_i dépendantes du temps ce qui est plus complexe à prédire par des

méthodes numériques. On présente ainsi sur les Fig. 5(a) et 5(b), les projections des écarts respectifs entre théorique-obtenu et théorique-optimisé.

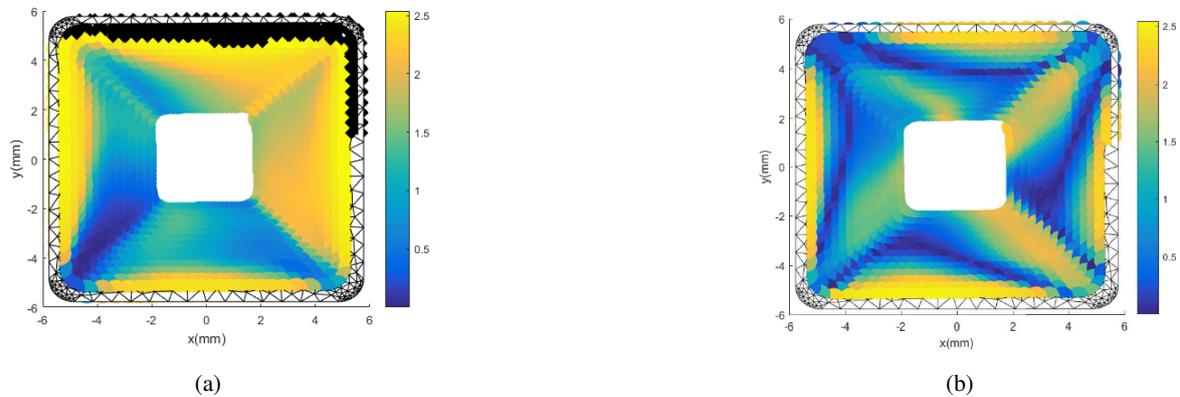


FIGURE 5 – Comparaison (a) Théorique/Obtenue (b) Théorique/Optimisée

On présente également sur la Fig. 6, une section transversale montrant l'écart géométrique entre les pièces théorique, obtenue et optimisée.

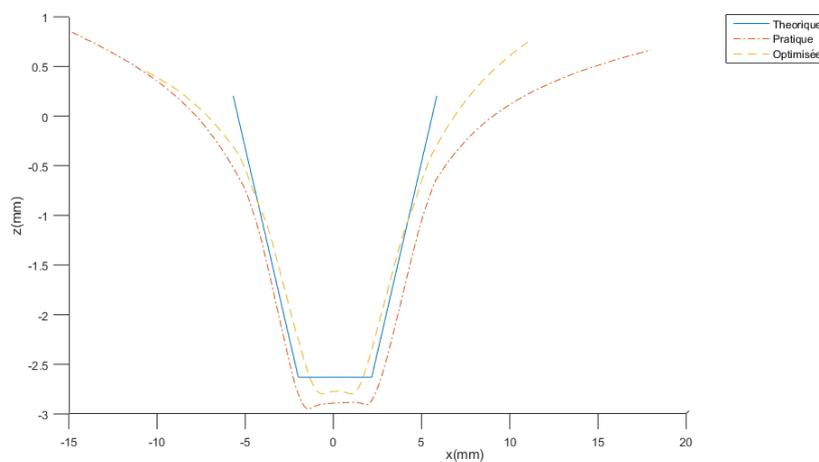


FIGURE 6 – Coupe des pièces obtenue, théorique et optimisée

L'effet du parcours optimisé se remarque par un décalage total diminué de 35.32% (Tableau 1). Le décalage minimum est non significatif car il est de l'ordre du μm . Le décalage moyen est réduit de 38.29% et l'écart-type est réduit de 42.03%. On peut observer l'influence de la géométrie de la matrice impliquant une erreur importante de forme sur la section de la pyramide qui s'estompe au fur et à mesure du formage.

Polypropylène		
	Obtenu	Optimisé
Décalage Total (mm)	783.920	507.051
Décalage Minimum (mm)	$3.192 \cdot 10^{-3}$	$0.615 \cdot 10^{-3}$
Décalage Maximum (mm)	2.539	1.918
Décalage Moyen (mm)	0.653	0.403
Ecart-type (mm)	0.483	0.28

TABLE 1 – Analyse entre pièce obtenue et théorique

5 Conclusion

La technique développée permet de minimiser l'écart entre CAO et pièce obtenue.

Pour la suite de cette étude, l'algorithme de compensation sera implémenté dans l'outil numérique proposé par Thibaud et al.[5]. La trajectoire initiale pourra ainsi être modifiée par corrélation essais-calculs. Dans le cas de simulations prédictives [6], l'objectif est de déterminer par prédiction les trajets d'outils menant à minimiser l'écart géométrique entre le modèle CAO et la pièce réalisée.

Une deuxième méthode vise à utiliser la génération paramétrique de trajectoire d'outils afin de faire varier les trajets de déformations et de proposer une méthode la plus rapide et efficace possible afin d'identifier le comportement des matériaux testés [6].

Références

- [1] McAnulty. T, Jeswiet. J, Doolan. M, Formability in single point incremental forming : A comparative analysis of the state of the art, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 16 (2017) 43–54.
- [2] Hirt. G, Ames. J, Bambach. M, Kopp. R, Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 53 (2004) 203–206.
- [3] Skjødt. M, Bay. N, Endelt. B, Ingarao. G, Multi stage strategies for single point incremental forming of a cup, *International Journal of Material Forming*, 1 (2008) 1199–1202.
- [4] Micari. FABRIZIO, Ambrogio. G, Filice. L, Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming : state of the art and future trends, *Journal of Materials Processing Technology*, 191 (2007) 390–395.
- [5] Thibaud. S, Ben Hmida. R, Richard. F, Malécot. P, A fully parametric toolbox for the simulation of single point incremental sheet forming process : Numerical feasibility and experimental validation, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 29 (2012) 32–43.
- [6] Hapsari. G, Ben Hmida. R, Richard.F, Thibaud. S, Malécot.P A Procedure for Ductile Damage Parameters Identification by Micro Incremental Sheet Forming, *Procedia Engineering*, 183 (2017) 125–130.