

Titre :

Génération et évaluations de trajectoires curvilinéaires pour le fraisage de cavités 2.5D

Résumé

Dans le cadre du processus de fabrication d'une cavité 2.5D par fraisage, le bureau des méthodes est chargé de définir l'ensemble de la gamme, comme le choix des outils, les paramètres de coupe, les trajectoires et le bridage de la pièce. Si des outils d'aide à la décision existent pour plusieurs de ces aspects, aucun ne permet actuellement de guider le choix d'une trajectoire. En conséquence, malgré la diversité des stratégies proposées par les logiciels de FAO, seules les méthodes « Zig-Zag » et « Contour Parallel » sont couramment utilisées dans l'industrie. Ces trajectoires classiques, bien que courtes, présentent une géométrie anguleuse et sont qualifiées de non fluides. De plus, leur complexité augmente significativement en présence de cavités aux bords irréguliers ou comportant des îlots. Comme le temps d'usinage est un facteur déterminant économiquement lorsque la cavité est réalisée dans un matériau facilement usinable, l'aspect court de ces trajectoires agit favorablement sur le temps d'usinage alors que leur non fluidité pèse défavorablement sur ce dernier.

Dans la littérature, de nouvelles méthodes de génération de trajectoires en spirale ont été développées, qualifiées de fluides en raison de leur capacité à éviter les discontinuités en tangence, caractéristiques des approches classiques. Bien que ces trajectoires présentent une meilleure continuité géométrique, elles sont généralement plus longues que les trajectoires conventionnelles. Par ailleurs, l'application de ces méthodes à des cavités de géométrie complexe sur leurs bords ou présentant des îlots, demeure problématique. Enfin, l'absence de tests sur une base commune de cavités standard limite les possibilités de comparaisons objectives avec les méthodes existantes.

Sur le plan théorique, cette thèse propose une généralisation d'une méthode publiée grâce à l'utilisation des splines d'Hermite quartiques et est baptisée méthode HQ. Elle permet la génération de trajectoires spirale de classe C^2 dans des cavités complexes comportant des îlots. Afin de quantifier la notion qualitative de fluidité, un nouveau concept, nommé 'efficacité dynamique', est introduit. Ce concept, modélisé de manière empirique, complète un ensemble d'indicateurs permettant d'analyser la qualité d'une trajectoire avant toute mise en œuvre sur machine-outil. Ce cadre d'évaluation constitue la base d'un outil d'aide à la décision pour les bureaux des méthodes et offre des perspectives pour l'optimisation multicritère des stratégies de fraisage.

Sur le plan expérimental, cette thèse confronte les trajectoires classiques « Zig-Zag » et « Contour Parallel » à deux trajectoires spirale : « Morph Spiral », issue des logiciels de FAO, et « HQ », développée

dans le cadre de ce travail. Des essais en l'air ont été réalisés, sur cinq cavités d'intérêt industriel, déclinées en trois tailles et testées à trois vitesses d'avance, afin de simuler différentes dynamiques de machine. La définition rigoureuse de ces cavités, ainsi que l'évaluation systématique de plusieurs critères, ont permis d'établir un benchmark de comparaison des trajectoires, comblant ainsi un manque identifié dans la littérature.

Cette thèse propose donc une méthode innovante de génération de trajectoires spirale fluides, adaptée aux cavités complexes avec îlots, et introduit un cadre d'évaluation multicritère incluant la fluidité, quantifiée par l'efficacité dynamique. Elle établit également un benchmark expérimental rigoureux permettant une comparaison objective des stratégies de fraisage et ouvre la voie pour un outil d'aide à la décision à destination du bureau des méthodes.

Title:

Generation and Evaluation of Curvilinear Toolpaths for 2.5D Cavity Milling

Abstract :

In the context of manufacturing a 2.5D cavity by milling, the process planning department is responsible for defining the entire process plan, including tool selection, cutting parameters, toolpaths, and workpiece clamping. While decision-support tools exist for several of these aspects, none currently guide the choice of toolpath. Consequently, despite the wide variety of strategies offered by CAM software, only the “Zig-Zag” and “Contour Parallel” methods are commonly used in industry. These classical toolpaths, although short, exhibit angular geometry and are considered non-smooth. Moreover, their complexity increases significantly when dealing with cavities with irregular boundaries or internal islands. Since machining time is a key economic factor when working with easily machinable materials, the shortness of these paths positively impacts machining time, whereas their lack of fluidity has a negative impact.

In the literature, new spiral toolpath generation methods have been developed, described as fluid due to their ability to avoid tangency discontinuities typical of classical approaches. Although these paths offer better geometric continuity, they are generally longer than conventional ones. Moreover, applying these methods to cavities with complex boundaries or internal islands remains challenging. Finally, the absence of testing on a common set of standard cavities limits the possibilities for objective comparisons with existing methods.

Theoretically, this thesis proposes a generalization of a previously published method using quartic Hermite splines and is called “HQ method”. It allows the generation of C^2 -class spiral toolpaths in complex cavities with islands. To quantify the qualitative notion of smoothness, a new concept called ‘dynamic efficiency’ is introduced. This empirically modelled concept complements a set of indicators designed to assess the quality of a toolpath before any implementation on a machine tool. This evaluation framework forms the basis of a decision-support tool for process planning departments and opens perspectives for multi-criteria optimization of milling strategies.

On the experimental side, this thesis compares the classical “Zig-Zag” and “Contour Parallel” toolpaths with two spiral paths: “Morph Spiral,” available in CAM software, and “HQ,” developed in the context of this work. Air-cutting tests were carried out on five industrially relevant cavities, each in three sizes and tested at three feed rates to simulate different machine dynamics. The rigorous definition of these

cavities, as well as the systematic evaluation of several criteria, enabled the establishment of a benchmark for toolpath comparison, thus addressing a gap identified in the literature.

This thesis therefore proposes an innovative method for generating smooth spiral toolpaths suited to complex cavities with islands, and introduces a multi-criteria evaluation framework including smoothness, quantified through dynamic efficiency. It also establishes a rigorous experimental benchmark for objective comparison of milling strategies and paves the way for a decision-support tool aimed at process planning departments.