

エンドミル加工のための切削関与角一定化工具経路の生成

京都大学工学研究科 茨木 創一, 池田 大作, 山路 伊和夫, 垣野 義昭, (株)加工技術研究所 西田 晋

Tool Path Design for Constant Cutting Engagement in End Milling Processes
 Kyoto University Soichi IBARAKI, Daisaku IKEDA, Iwao YAMAJI, Yoshiaki KAKINO, and
 Manufacturing Technology Institute, Inc. Susumu NISHIDA

On contour-parallel tool paths that are often used in the machining of dies and molds, there are many regions where the tool is subject to significant variation of cutting forces. Particularly in finishing processes, such a variation of cutting forces often degrades machining accuracy and surface finish. This paper proposes an algorithm to generate contour-parallel tool paths that maintain constant cutting engagement angle throughout any given two-dimensional contour geometry. By maintaining the cutting engagement angle constant, the cutting force can be regulated approximately constant under constant feedrate, which potentially improves the machining accuracy in a significant manner. The validity of the proposed tool path generation schemes is investigated by preliminary machining experiments on hardened steel by using a straight end mill.

1. 結論

(Al,Ti)N コーティングされた超硬エンドミル工具の普及により, HRC53 程度の硬さをもつダイス鋼の直彫り切削加工が可能となり, 金型の製造工程の合理化が進んできた. 現在市販されている金型加工用 CAM システムは, 加工形状に対して幾何的に工具中心経路(以下工具パスと呼ぶ)を設計するのみと言ってよく, 加工そのものに関する考慮は非常に少ない. 例えば, 金型加工では逆オフセット法により作成された等高線工具パスが用いられることが多いが, 特に高硬度材の加工の際にはしばしば問題を生じる. 例えば, 曲率半径の小さな隅部などでは切削抵抗が急増し, 工具損傷の原因となりやすい. 仕上げ加工においても, 切削抵抗の変動は加工精度と仕上げ面粗さに悪影響を与える. このような問題に対して, 送り速度の最適化により切削抵抗の変動を抑制する手法はこれまでに多く研究がなされ¹⁾, 単純なものは既に実用化され一定の効果を上げている. しかし, 特に仕上げ加工においては仕上げ面の品位の観点から送り速度の制御は難しく, 仕上げ精度を向上するためには, 加工能率をある程度犠牲にして, 切り込み量や送り速度を低減せざるを得ない.

本論文では, 与えられた初期工具パスを切削関与角が常に一定となるように修正する方法を提案し, 送り速度を変化させることなく切削抵抗一定化を実現する手法を検討する.

2. 切削関与角が一定となる工具経路の生成法

2.1 アルゴリズム : 前向き輪郭線修正法

例として, キャビティ形状を, 等高線パスを用いて内側から外側へ加工していく場合を考える. アルゴリズム では, 与えられた初期工具中心経路を, 以下の手法に基づき内側の輪郭線から外側の輪郭線へ順に修正していく.

図 1 にアルゴリズム の概要を示す. 前加工面の軌跡, 工具半径, 及び初期工具パス o_i ($i=1, \dots, N$) は与えられているものとする. ここでは, 初期工具パスは逆オフセットにより求められた径方向切り込み量一定の等高線パスであるとし, それを切削関与角が一定化されるように修正すると考える. すなわち, 与えられた工具中心位置 o_i を, 直角方向に距離 x_i だけ移動させ, 切削関与角が目標値 α_i になるようにする. 修正距離 x_i は以下のアルゴリズムにより求められる.

(1) 工具中心位置 o_i を初期値だけ移動させた時の切削関与角 α_i^0 を求める.

(2) 目標値 α_i との誤差 e_i に基づき, ニュートン法の 1 ステップを実行する.

$$e_i = \alpha_i - \alpha_i^0 \quad (1)$$

$$x_i = x_{i-1} - e_i \frac{de_i}{dx_i} \quad (2)$$

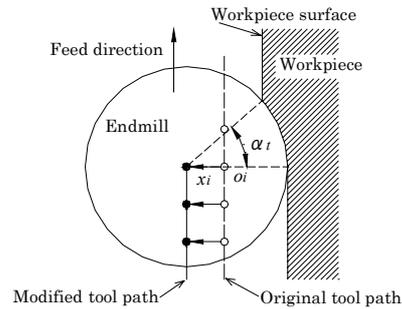


Figure 1 Schematics of tool path modification

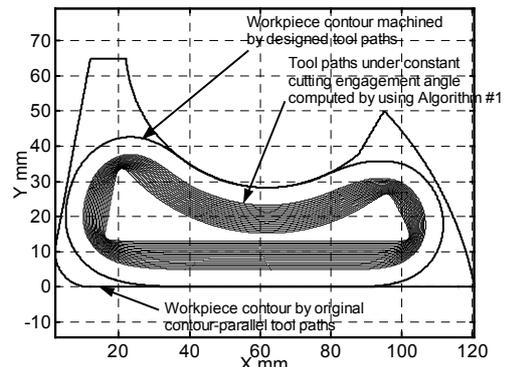


Figure 2 An example of tool paths under constant cutting engagement angle computed by using Algorithm I

(3) 以上 (1)(2) を全ての i について繰り返す.

ただし, 工具中心位置 o_i , 修正距離 x_i が与えられた時, 切削関与角 α_i は工具と前加工面の幾何学的干渉から求める事ができる. (2) において, 勾配 de_i / dx_i はこの関数を用いて数値的に計算する.

2.2 アルゴリズム : 後ろ向き輪郭線修正法

上記のアルゴリズム I を用いて作成した, 切削関与角が一定化となる工具経路の一例を図 2 に示す. この例から明らかなように, アルゴリズム では, キャビティ形状を内側から外側へ加工していく場合, 最終輪郭線において修正量が一般に最も大きくなり, 指定の仕上げ形状を出すことはできない. それに対し本節で示すアルゴリズム では, 最終輪郭線から内側に向かって修正を進行させる. 最終輪郭線は修正が加えられないため, 最終的な仕上げ形状は初期工具経路を用いた場合と同一となる.

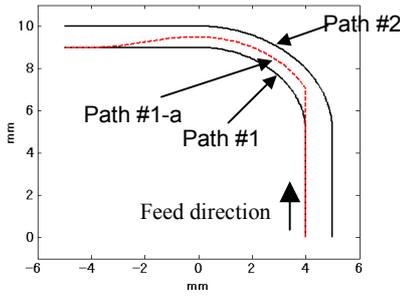


Figure 3 An example of tool path generation by Algorithm II

この方法では、与えられた工具パスは修正せず、図1で示されている前加工面を修正すると考える。実際には、前加工面を修正するためには、ひとつ内側のパスを修正する必要がある(内側のパスから外側のパスへ加工していく場合)。前加工面を、切削関と角が目標値 α_f になるように工具パスに対して直角方向に距離 x_f だけ移動させる。 x_f を求めるアルゴリズムは前節の方法と同様である。図3にアルゴリズムを用いて作成された工具経路の一例を示す。Path #1, Path #2の順に加工する場合を想定する。Path #1をPath #1-aに修正することにより、Path #2 切削時における切削関と角が一定化される。

3. 検証実験

図4に示す単純な工具経路に対し、上記のアルゴリズムを適用して切削関と角を一定化した工具経路を生成し、切削抵抗及び加工精度を検証する。切削実験に用いた工具は直径10mm, 4枚刃の(AI, Ti)Nコーテッド超硬ストレートエンドミル, 被削材はダイス鋼 SKD61(HRC53)を用いた。切削条件を表1に示す。図4に示した半径方向切り込み量が一定($R_d=0.1mm$)の等高線工具経路では、直線部における切削関と角は 11.5° であるのに対し、円弧部では 19° に増加する。図4に示した工具経路に対し、アルゴリズムを用いて切削関と角が 11.5° に一定化されるように前加工面を修正した。

半径方向切り込み量が一定の工具パスと、アルゴリズムを適用した工具パスとを用いて切削を行ったときの切削抵抗を、工具動力計を用いて測定した結果を図5に示す。送り速度は両者とも等しい。前者の場合、円弧部で切削抵抗の増大が見られるが、後者では定常状態における切削抵抗の変動は17N以内に抑制されている。

次に、それぞれの工具パスを用いた場合の加工面の、指令軌跡に対する形状誤差を、図2中の面A, Bを基準面として三次元測定機を用いて測定し、比較した結果を図4に示す。半径方向切り込み量一定の工具経路の場合は円弧部において削り残し量が最大 $14\mu m$ 存在したが、切削関と角を一定化した場合、直線部との接続部に約 $4.5\mu m$ の誤差が残っている他は大幅に低減できた。切削関と角の一定化により、切削抵抗がほぼ一定化され、それにより工具倒れ、加工面の形状誤差が一定化できるためである。

4. 結論

- (1) 切削関と角を一定に制御することにより、切削抵抗をほぼ一定化した加工が可能となる。
- (2) 仕上げ面の加工を行う工具パスのひとつ内側の工具パスに提案した手法を適用することにより、工具倒れ量の変動を抑制し加工精度を最適化することが可能である。これを応用して、加工能率を犠牲にすることなく高精度加工が行える可能性がある。

金型加工における仕上げ加工にはボールエンドミルが用いられることが多い。本論文で提案した手法のボールエンドミルを用いた加工への拡張は現在検討中である。

参考文献

[1] 例えば、垣野, 大塚, 中川, 佐々木: 焼入れ鋼のエンドミル加工に関する研究(第1報), 精密工学会, 66, 5 (2000), 730.

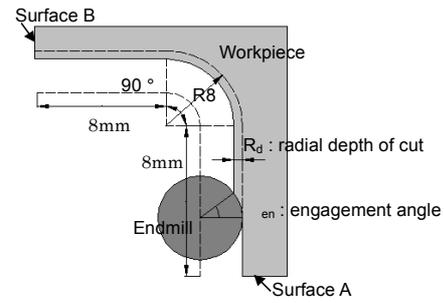


Figure 4 Schematics of cutting experiment

Spindle speed	4,775 rpm
Feed per tooth	0.04 mm/tooth
Cutting direction	Down cutting
Axial depth of cut	5 mm
Coolant	Dry air

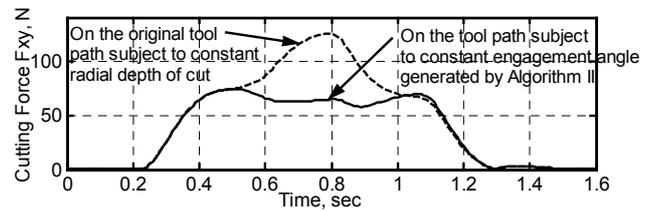
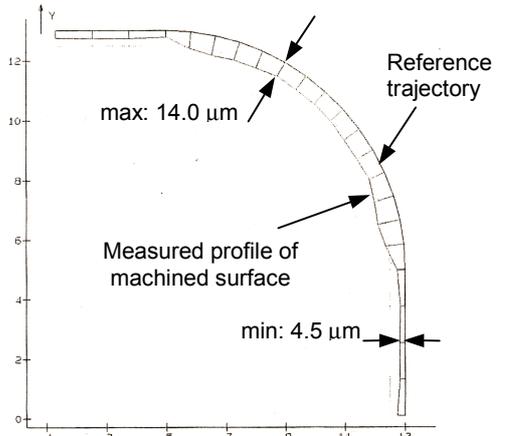
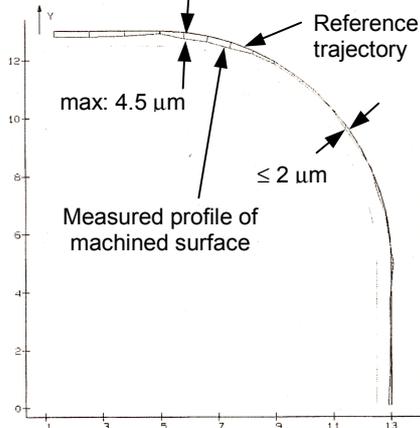


Figure 5 Comparison of cutting forces



(a) Case 1: Machined by the original tool path under constant radial depth of cut



(b) Case 2: machined by the modified tool path under constant engagement angle

Figure 3 Geometrical surface error profiles measured by using a coordinate measurement machine