

## エンドミル加工における工具進入・退出重複部の工具経路の修正法

京都大 ○工藤朋也, 京都大 茨木創一, 京都大 松原厚

### 要旨

金型加工・部品加工などで多用される等高線工具経路（工具パス）において、工具の進入パスと退出パスが重複する部分にくぼみ状の加工誤差が現れることが多い。本研究では、このようなくぼみ状の加工誤差を解消するため、工具の退出パスの修正法を提案した。検証実験によって、従来の工具パスに比べると加工誤差が低減したが、十分な低減には至らないことを確認した。

### 1. 緒言

NC 工作機械を用いた金型加工・部品加工などにおいて、工具中心軌跡（以下、工具パスと呼ぶ）は一般に CAM ソフトウェアによって作成され、最終形状の輪郭線を順次オフセットして得られる等高線工具パスがひろく用いられる<sup>1)</sup>。図1に、2次元平面上のポケット形状のキャビティを、ストレートエンドミルを用いて加工するための等高線工具パスの一例を示す。仕上げパスは、最終形状の輪郭線を工具半径だけ内側にオフセットして得られるが、このような最終形状を創成する工具パスを本論文では便宜的に形状パスと呼ぶ。形状パスの加工を行うためには、工具が形状パスにアプローチするための工具パス（以下、進入パスと呼ぶ）と、工具が形状パスから退避するための工具パス（以下、退出パスと呼ぶ）が必要となるが、一般には、加工機の輪郭運動誤差の影響を最小化するために、進入・退出パスには円弧パスが用いられ、かつ両者は形状パスと滑らかに接続される場合が多い。一般に、進入パスから形状パスに切り替わる点（以下、進入点と呼ぶ）と形状パスから退出パスに切り替わる点（以下、退出点）は重複する。この重複した進入・退出点付近において、加工面にくぼみ状の加工誤差が生じる場合が多い。鈴木<sup>2)</sup>、および中野ら<sup>3)</sup>は、この誤差の原因が、工具に作用する切削抵抗により生じる、工具のたわみの変化にあることを示した（本論文では、工具のたわみによって生じる加工点の指令位置からの誤差を、削り残し量と呼ぶ）。ゼロカットを行えばくぼみ状の加工誤差は回避できるが、加工時間が長くなってしまい能率的ではない。

そこで本論文では、退出パスの修正法を提案し、工具の進入・退出重複部における削り残し量を一定化し、仕上げ面を平滑化する手法を検討する。

なお、3次元自由形状の仕上げ加工ではボールエンドミルが用いられることが多いが、本研究ではそれを考える基礎として、問題を単純化するためにストレートエンドミルによる側面加工を対象とし、工具と被削材の2次元平面上での干渉のみを考える。

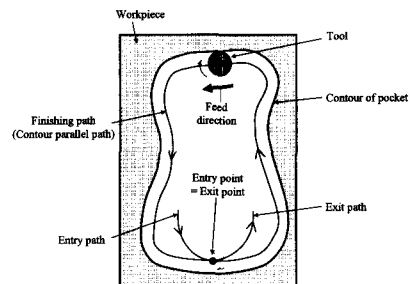
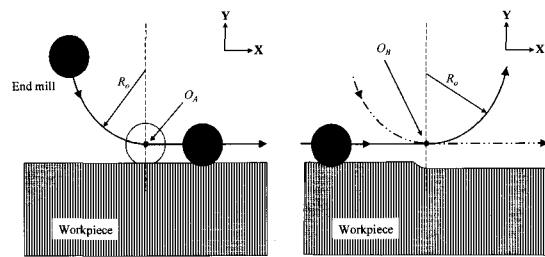


Fig.1 An example of contour parallel tool path in pocket machining using end mill

### 2. 工具の進入・退出重複部における加工誤差の原因

例として、直線状の形状パスに対して、図2に示すような円弧状の工具パスで進入・退出を行う場合を考える。図中の記号で、 $O_A$ ：進入点、 $O_B$ ：退出点、 $R_o$ ：進入パスおよび退出パスの円弧半径、とする。このパスでは、円弧半径  $R_o$  の進入パスで加工面に切り込み始め、点  $O_A$  にて進入パスから形状パスに滑らかに切り替わる。そして再び形状パスから点  $O_B$  にて退出パスに滑らかに切り替わり、工具が加工面から退出する。従来、 $O_A = O_B$  とされるのが一般的で、このような工具パスを以降では従来パスと呼ぶ。



(a) From entry path to finishing path (b) From finishing path to exit path

Fig.2 Schematics of original path

このような従来パスで加工した場合には、以下のようにして、工具の進入・退出重複部にくぼみ状の加工誤差が発生すると考えられる。まず、図2(a)に示したように、進入パスにおいて径方向切り込み量が0から徐々に増加し、形状パスにて一定値に達する。工具は切り込み量に応じた切

削抵抗を受けるため、工具倒れとそれに伴う削り残しが生じ、実際に形成される加工面は指令軌跡から誤差が生じる。次に、図2(b)に示したように工具が退出点に近づくと、先に進入パスによる加工面が形成されているため、切削関与角が小さくなり工具の倒れ量が小さくなる。さらに退出パスによって切削されることにより、進入・退出重複部で削り残し量が小さくなった、くぼみ状の加工誤差が生じると考えられる。

### 3. 退出パスの修正法

この従来パスを以下のように修正する。ただし、加工機の輪郭運動誤差を最小化するため、退出パスは円弧であり、かつ形状パスと滑らかに接続するという制約のもと、退出パスを修正する。模式図を図3に示す。進入パスは変えず、退出パスの開始点  $O_B$  を  $x_m$  だけ  $-x$  方向にシフトし、退出パスを、点  $O_B$  で形状パスに接し円弧半径  $R_m$  をもつ円弧パスとする。なお、 $x_m$  は点  $O_A$  と点  $O_B$  との距離で、正值とする。修正パスを決定する幾何的パラメータのうち、 $x_m$  に関しては、前加工面と進入パス、および形状パスが与えられれば幾何的に一意に決定される量をその値とする。 $R_m$  に関しては、垣野ら<sup>4)</sup>のモデルを参考とし、削り残し量は切削関与角の2乗に比例するとしたモデルを基礎とした、仕上げ形状を予測するシミュレータを用いて、仕上げ面のうねり曲線の最大高さ  $W_z$ <sup>5)</sup> が最小となるような  $R_m$  を探索し、 $R_m$  の最適値とする。

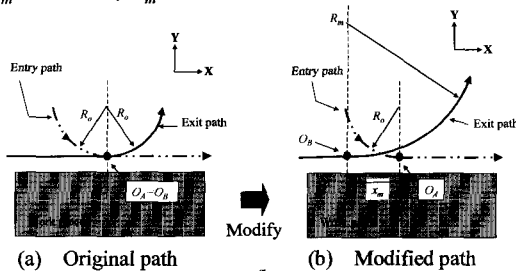


Fig.3 Tool path modification

### 3. 検証実験

図3に示した従来パスおよび修正パスを用いて加工し、仕上げ面の断面曲線を触針式表面粗さ計で測定し、比較する。また、従来パスおよび修正パスによる仕上げ面をシミュレートし、断面曲線の測定結果と比較する。加工条件を表1に示す。工具は直径6mm、6枚刃の(Ti, Al)コーテッド超硬ストレートエンドミルを用いた。また、図3において、 $R_0 = 50$  mmとし、この半径をもつ進入パスと工具半径、および径方向切り込み量から、 $x_m = 4.02$  mmとした。

従来パス・修正パスを用いて加工した仕上げ面の断面曲線とシミュレーション結果の比較を図4に示す。従来パス・修正パスの断面曲線からうねり曲線の最大高さ  $W_z$  を計算すると、それぞれ  $8.7 \mu\text{m}$ 、 $5.1 \mu\text{m}$  となり、 $W_z$  は約60%に低減された。また、図4から、シミュレーションによる仕上げ形状の予測は十分な精度で行うことができている。円弧で、かつ形状パスに滑らかに接続された退出パスを用

いる限り、これ以上の大きな低減は望めないことを示すことができたと言える。ただし、仕上げ面を平滑化できたとは言えず、これ以上低減するためには加工条件を変更するか、滑らかに接続されていない退出パスを用いる必要があるが、その場合加工機の輪郭運動誤差が問題となる可能性がある。

Table 1 Cutting conditions

Workpiece	SKD61(HRC53)
Spindle speed	16,000 min <sup>-1</sup>
Feed per tooth	0.03 mm/tooth
Cutting direction	Down cutting
Tool extension	24 mm
Tool runout	< 10 $\mu$ m
Radial depth of cut	0.1 mm
Axial depth of cut	3 mm
Coolant	Oil mist

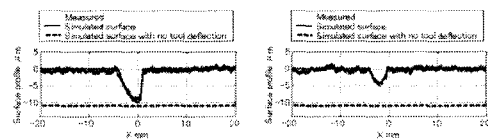


Fig.4 Effect of tool path modification

### 4. 結言

- (1) 切削抵抗による削り残し量は切削関与角の簡単な関数で与えられるとモデル化し、仕上げ形状を予測するシミュレータを構築した。
- (2) 上記のシミュレータを利用した退出パスの修正法を提案した。従来パスに比べるとうねり曲線の最大高さを低減できたが、仕上げ面の十分な平滑化には至らなかった。

### 参考文献

- 1) 例えば、Mohammad Sharif Uddin : Tool Path Modification Approaches to Enhance Machining Geometric Accuracy in 3-Axis and 5-Axis Machining : 京都大学学位論文 (2007)
- 2) 鈴木康彦 : モデルに基づいた NC 工作機械の運動誤差と加工精度の向上に関する研究, 京都大学学位論文 (2005)
- 3) 中野雅之, 中川平三朗, 奥野聖人, 喜田義宏 : 高精度輪郭研削法に関する基礎的研究, 2004 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2004)
- 4) 垣野義昭, 大塚裕俊, 中川平三朗, 廣垣俊樹, 佐々木将志 : 焼入鋼のエンドミル加工に関する研究 (第1報), 精密工学会誌, 66, 5 (2000) 730
- 5) JIS B 0601-2001, 製品の幾何特性仕様 (GPS) - 表面性状 : 輪郭曲線方式 - 用語, 定義及び表面性状パラメータ (2001)