

# バレル工具を用いた自由曲面の5軸制御加工経路生成

電気通信大学 ○鈴木智信, 電気通信大学大学院 ©森重功一

## 要旨

本研究は、バレル工具を用いた5軸制御加工による自由曲面加工の効率化を目的としている。バレル工具は再研磨が難しく、切れ刃を満遍なく使う経路が望まれている。また、実際の加工では急激な工具姿勢の変化は加工面性状に悪影響を及ぼす。そこで、切れ刃の接触箇所を連続的かつ満遍なく変化させることにより工具寿命を向上させる手法を提案する。開発したシステムを用いた加工シミュレーションによりその有効性について検証した。

## 1 序論

近年、自由曲面をもつ製品が増加している。削り出し部品や金型等の仕上げ加工において、自由曲面の高精度かつ効率的な加工技術に対する要求が高まっている。

本研究は、バレル工具を用いた5軸制御加工による自由曲面加工の効率化を目的としている。バレル工具を用いると、図1に示すように小径の工具でも大径のボールエンドミルを用いた場合と同じ効率で加工を行うことができる。その反面、再研磨が難しく切れ刃を満遍なく使う経路が望まれている。また、実際の加工では急激な工具姿勢の変化は加工面性状に悪影響を及ぼす。

本研究では、切れ刃の接触箇所を連続的かつ満遍なく変化させることにより工具寿命を向上させる手法を提案する。開発したシステムを用いた加工シミュレーションによりその有効性について検証した。

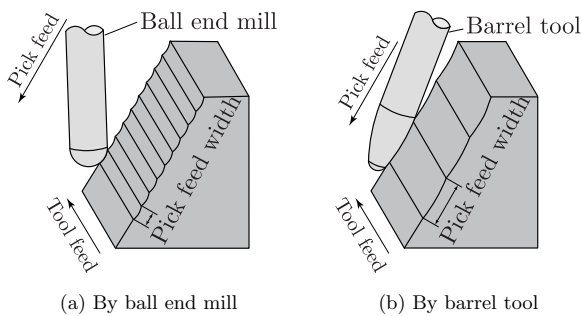


Fig.1 Comparison of pick feed width

## 2 工具経路の生成

### 2.1 バレル工具の設定

本研究で扱うバレル工具は、オーバelform工具と呼ばれるものである。加工面に対して様々な姿勢が取れるため、干渉回避がしやすいことが特徴である。バレル工具の模式図を図2に示す。ここでは、工具半径を  $r$ 、バレル部の円の半径を  $r_1$ 、先端ボール部の半径を  $r_2$ 、バレル部の円の中心を  $O_b$ 、先端ボール部の中心を  $O$  と定義した。

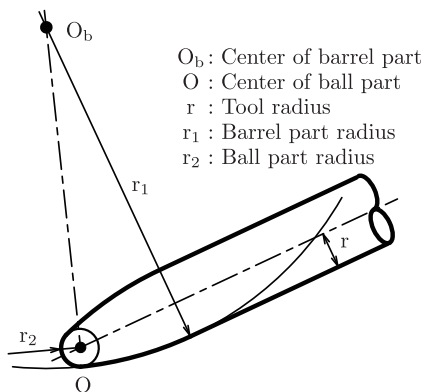


Fig.2 Barrel tool

### 2.2 切削点の生成

自由曲面は、2つのパラメータ  $u, v$  を媒介して表現される。ここでは、工具送り方向を  $u$ 、ピックフィード方向を  $v$  とする。

加工面が平面の場合、工具切れ刃の半径  $r$ 、ピックフィード量  $f$ 、カスプ高さ  $h$  には  $f = 2\sqrt{h(2r-h)}$  の関係が成り立つ。  $r=r_1$  として、目標とするカスプ高さからピックフィード量を計算する。図3に示すように、隣り合う加工点同士の距離  $d$  が  $f$  以下となるように  $v$  を設定し、加工点群を作成する。

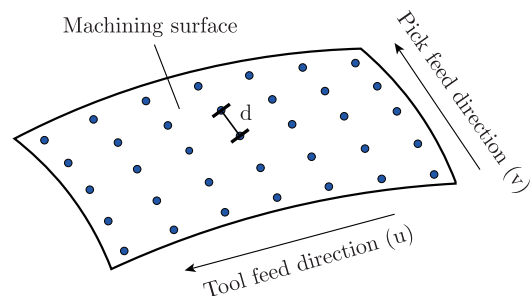


Fig.3 Generation of cutting point

### 2.3 工具姿勢の決定

工具経路 (Cutter Location : CL) は、工具中心点と工具軸ベクトルで指定される。ここでは図4に示すように、工具軸ベクトルを  $T$ 、工具中心点を先端ボール部の中心  $O$  とする。バレル部のシャンク側の接点を  $A_0$ 、ボール側の接点を  $A_N$  とし、  $O_bA_0$  と  $O_bA_N$  間の角度  $\theta$  を  $N$  等分するように  $\theta_n (n=1, 2, \dots, N)$  を設定し、それぞれの角度に対応する切削点  $A_n (n=1, 2, \dots, N)$  を算出する。

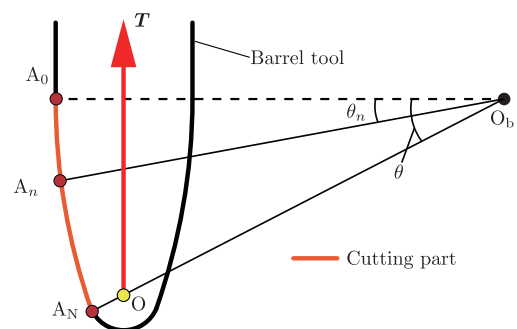


Fig.4 Generation of cutting edge point

図5に示すように、  $i$  パス目に  $L$  おける加工点を  $P_i$  とし、  $A_n$  を加工点  $P_i$  に配置することを考える。ピックフィード方向の加工点  $P_i$  から次パスの  $P_{i+1}$  を指すベクトル  $F_p$  と加工点での法線ベクトル  $n$  からなる平面を考える。  $t$  を  $F_p$  と  $n$  の外積とする。ベクトル  $x$  の周りに右ねじの方向に角度  $\alpha$  だけ回転させる回転変換マトリクス  $R(x, \alpha)$  を用いて、  $O$  と  $T$  は式 (1), (2) から求められる。ここで  $L$  は工具中心点  $O$  から直線  $O_bA_0$  までの距離である。

$$O = P_i + r \cdot n - L \cdot R(t, \pi/2)n + r_1 \cdot n - r_1 \cdot R(t, -\theta_n)n \quad (1)$$

$$T = R(t, \pi/2 - \theta_n)n \quad (2)$$

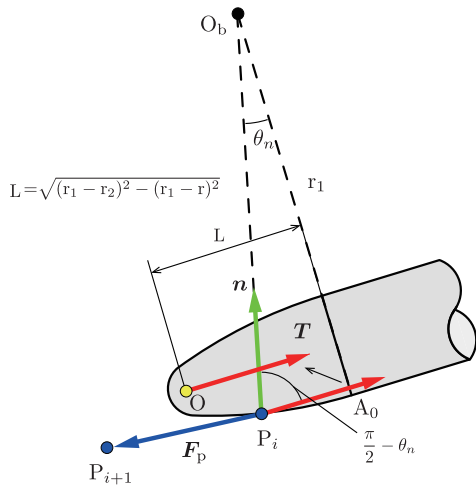


Fig.5 Placement of tool axis vector

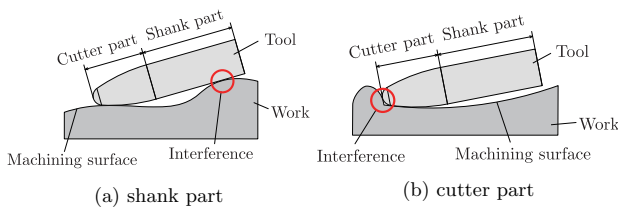


Fig.6 Example of tool interference

5軸制御加工は工具が加工対象物に干渉する可能性も高くなる。図6(a)にシャンク部、図6(b)に切れ刃が加工対象物に干渉している例を示す。本研究では、1パスごとに加工面に対して同じ工具姿勢で切削を行うものとし、あらかじめ工具が干渉する姿勢を調べる。図7に示すように、各パスごとに  $A_n$  で切削を行った場合に干渉が生じるかを判定し、干渉のない  $A_n$  の分布を調べる。

まず図中(a)のように1パス目で干渉の生じない  $A_n$  の中で  $n$  が最小のものを選ぶ。(b)のように、次のパスで同一  $A_n$  もしくは  $A_{n+1}$  で切削が行えない場合は、初期姿勢を選びなおす。(c)のようにパスごとに  $n$  を1ずつ増やして  $A_n$  を変えながら切削を進める。(d)のように  $n$  を1増やすと干渉が生じる場合は、同一の  $A_n$  で切削を行う。

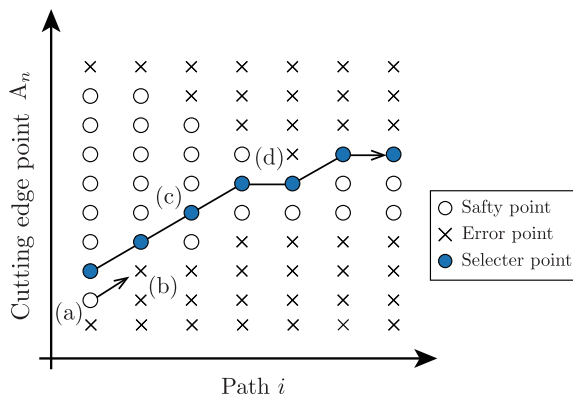


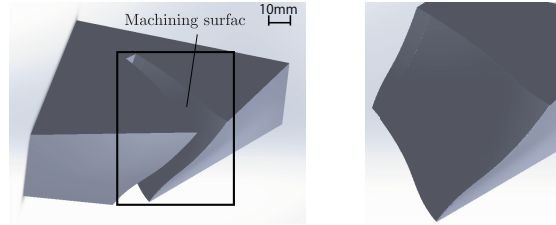
Fig.7 Selection of cutting point

### 3 検証実験

生成した工具経路の有用性を検証するために、加工シミュレーションを行った。使用するバレル工具は、 $r=3$ ,  $r_1=96$ ,  $r_2=1$  とした。目標形状を図8(a)、加工面を図8(b)に示す。加工前の形状として加工の対象とする面を0.2mm オフセットしたものをを用いた。目標カスプ

高さ  $5\mu\text{m}$  として、パス数は10となった。

加工の様子を図9に示す。工具姿勢が急変せず、連続的に変化していることが確認できた。また比較のために、同径のボールエンドミルによるシミュレーションも行った結果、パス数は50となった。バレル工具を用いるとパス数が5分の1になることを確認した。図10に加工後の削り残り高さの分布を示す。加工面の右側で削り残り高さが大きくなっているのは、形状が凸面であるためである。



(a) Target shape (b) Machining surface

Fig.8 Model for machining simulation

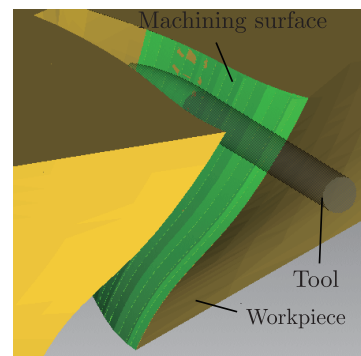


Fig.9 Simulation image of machining

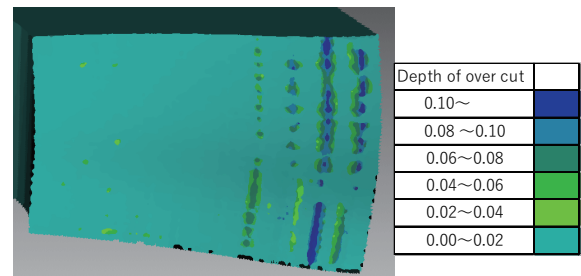


Fig.10 Machining result

### 4 結論

本研究では、バレル工具を用いた自由曲面の5軸制御加工経路生成に対して、切れ刃の接触箇所を満遍なく変化させ、また干渉回避の際に工具姿勢の急変を避ける経路生成の手法について検討した。加工シミュレーションにより、干渉がなく切れ刃の接触箇所を満遍なく使用した工具経路の生成ができた。バレル工具での高効率加工が可能であることを示し、本研究で提案した手法による経路生成法の有用性を確認した。

### 参考文献

- [1] LI Tian, CHEN Wuyi, XU Rufeng, WANG Dan, Flank Milling for Blisk with a Barrel Ball Milling Cutter, Key Engineering Material, Vol.202, p407-407(2009)
- [2] 森重功一, IoT時代に求められるCAMソフトウェア技術, 機械技術, Vol.65, No.13, p26-31, 日刊工業新聞社(2017)
- [3] 竹内芳美, 多軸・複合加工用CAM, 日刊工業新聞社(2008)