607 ボールエンドミルの高精度切れ刃生成用NCプログラムの開発

Development of NC-program to Generate High Precision Cutting Edge of Ball End Mill

正 城 道介 (茨城大) ○ 市川 祥隆 (茨城大院)

石川 正次(石川工具研磨製作所)

Michisuke JO, Ibaraki University, 12-1, Nakanarusawa 4-chome, Hitachi, Ibaraki

Yoshitaka ICHIKAWA, Student of Ibaraki University

Masatsugu ISHIKAWA, ISHIKAWA Tool Grind Co., Ltd.

The purpose of this research is to develop NC-program to generate highly precise cutting edge of ball end mill by improving existent NC-program. The cutting edge of ball end mill is generated as an intersection of two surfaces, R-gash and R-2. Two curved surfaces that are defined as enveloped surface of grinding wheel is calculated. We confirm that accuracy of the cutting edge which is decided depending on distance of this intersection and virtual sphere of specified radius is about 10 μ m with NC-program of a one path. Therefore, on the intersection of calculated R-gash and virtual surface of sphere, some dividing points are prepared, the absolute coordinate value of each dividing point is corrected using Steepest-descent-method, and this intersection and the intersection of calculated R-2 and virtual surface of sphere are brought close. NC-program of prural lines which computed coordinates after correction which followed the amount of the correction finally calculated and former coordinates is outputted. The accuracy in a simulation improved to about 0.7 μ m. The result of real grinding shows the accuracy of 2.0 μ m.

Key Words: NC-program, ball end mill, R-gash and R-2, the intersection, cutting edge

1. はじめに

本研究は静岡県沼津市にある石川工具研磨製作所(以下では石川工具と記す)との共同研究である。

研究目的は、石川工具で現在エンドミルの創生・再研磨に使用されているNCプログラムを改良し、高精度切れ刃を生成するNCプログラムを開発することである。

再研磨精度は切れ刃曲線と球面との距離によって決まり、ボールエンドミル^[1]の理想形状は切れ刃曲線が精確に球面に乗っていることである。切れ刃曲線とは、ボールエンドミル上の曲面 R-2 と R-gash の交線のことである。

従って本研究では、砥石の包絡面である二つの曲面をパラメータ曲面として生成し、曲面と球面との交線をそれぞれ算出し、NCプログラムの精度を検証する。そして、求まった二つの交線の片方を基準線として、もう一方の交線を基準線に近づけ、精度向上を図る。

2. 既存のNCプログラムの再現

既存のワンパスのNCプログラムを Fig. 1 に示す。

X-26.0000Y-2.7200Z-3.0000A-56.0000W40.0000F150

Fig.1 one path NC-program

既存のNCプログラムのシミュレーションを行い、切れ刃曲線と球面との距離をグラフ化した (Fig.2)。その結果、精度は約 11 μ m となった。実測値の約 10 μ m と比較しても遜色ない結果となったことから、既存のNCプログラムの再現に成功したと言える。

Fig.2 Distance between the spherical surface and the intersection curve of R-2- and R-gash surfaces by one path NC-program

3. モータ代数

モータ V は、角速度ベクトル v と直進モーメントベクトル v_0 を用いて式(1)のように記述できる。モータ代数^[2]を用い

ることで、ある瞬間の剛体上の任意の点 q における速度ベクトル v_q (式(2))を算出できる。

$$V = (v; v_0) \quad (1)$$

$$v_q = v \times q + v_0 \quad (2)$$

4. 包絡点, 包絡線, 包絡面の定義

包絡点とは、運動している砥石上のある点で、その点における速度ベクトルと砥石円筒面の法線ベクトルが垂直になる点のことである。ある瞬間において包絡点は複数存在し、その点列を繋いだ曲線を包絡線という。包絡線を各時刻毎に算出し繋ぎ合わせた曲面を包絡面という。

本研究では、曲面 R-gash と R-2 をそれぞれ砥石の包絡面として生成する。

5. 曲面の数式定義

5.1 R-2 面

R-2 において、角速度ベクトル v と砥石円筒面の中心軸ベクトル m がほぼ垂直になっている。数式定義の際に用いるパラメータは、時刻 t と角度 θ の二つである。角度 θ とは、Fig.3 に示すように砥石軸回りの回転角度のことである。

Fig.3 The envelope point of a tool (R-2)

砥石円筒面の中心軸 M に平行なベクトルを u_a とする。砥石の側面に u_a に平行な直線を考え、砥石の基準点 p_c からその直線に下した垂線の足から距離 f の位置にある点を p と定義する。点 p における速度 v_p は、式(3)のように表せる。

$$v_p = v \times p + v_0 \quad (3)$$

包絡点の定義 (式(4)) から、未知数 f を算出する。最終的に包絡点 p を式(5)を用いて算出する。

$$v_{qa} \cdot n = 0 \quad (4)$$

$$q_a = q_0 + a * u_t \quad (5)$$

これをパラメータ t, θ を用いた数式として定義する。

5.2 R-gash 面

R-gash において、角速度ベクトル $\mathbf{v}$ と砥石円筒面の中心軸ベクトル $\mathbf{m}$ がほぼ平行になっている。数式定義の際に用いるパラメータは、時刻 t と s の二つである。 s とは、Fig.4 に示すように速度モータ $\mathbf{V}$ 上の基準点 $\mathbf{p}_d$ と円筒に接する球の中心の間の距離である。

Fig.4 The envelope point of a tool (R-gash)

Fig.4 のように、砥石円筒面の中心軸 $\mathbf{M}$ を座標変換して Z 軸に重ねる。同じように座標変換した速度モータ $\mathbf{V}$ 上の点を中心とする球で、円筒面と接するような球を考える。この球の中心と円筒と球の接点が最短距離になる接点をラグランジュの未定乗数法を用いて求める。この接点から、パラメータ t , s を用いた数式として定義する。

6. 区分方式の考案と実装

6.1 区分方式の手順

算出した二つの曲面と球面との交線をそれぞれ算出し、二つの交線の距離を比較する。次に、R-2 側の交線上に幾つかの目標点を設け、R-gash 側の交線上に各目標点からの最短点となる点(区分点)を設ける^[3]。そして、R-2 側の交線を固定し、それを目標切れ刃曲線とする。R-gash 側の交線が目標切れ刃曲線に近付くように、各区分点における X , Y , Z 座標値を修正する。区分点を 9 個設けた場合 (Fig.5), 加工開始時と終了時の 2 点を合わせると合計 11 点となり、最終的に作成する NC プログラムの行数は 10 行となる。

Fig.5 The distance between the intersection of R-gash and the intersection of R-2

6.2 最急降下法による修正量の算出

最急降下法^[4]は、ポテンシャル面の傾きのみから、エネルギー極小値を探索するのに用いられる方法である。

下記の更新式を用いて、値を修正する。

$$\mathbf{P}^{(k+1)} = \mathbf{P}^{(k)} - \alpha \begin{bmatrix} \frac{\partial f(\mathbf{P}^{(k)})}{\partial x^{(k)}} \\ \frac{\partial f(\mathbf{P}^{(k)})}{\partial y^{(k)}} \\ \frac{\partial f(\mathbf{P}^{(k)})}{\partial z^{(k)}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

■ $\mathbf{P} = (x, y, z)$

■ $f = |\mathbf{P}|^2 = x^2 + y^2 + z^2$

■ $\alpha = \frac{1}{\sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2 + (\frac{\partial f}{\partial y})^2 + (\frac{\partial f}{\partial z})^2}}$

※ $\mathbf{P}$: 区分点から目標点へ向かうベクトル

※ α : 修正する割合を決めるパラメータ

6.3 区分方式の実装結果

区分方式を用いて作成した二つの曲面の切れ刃交線と球面との距離を Fig.6 に示す。

Fig.6 Distance between the spherical surface and the intersection curve of R-2- and R-gash surfaces by piecewise method
最大距離が約 $0.7 \mu\text{m}$ となり、精度の向上に成功した。

6.4 実際の加工結果

区分方式によって作成した新 NC プログラムを Fig.7 に、それ用いて実際に加工を行った結果を Fig.8 に示す。

```
X-4.0685Y-0.4081Z-0.4137A-8.7696W6.2640F150
X-2.0103Y-0.2282Z-0.2883A-4.3232W3.0880F150
X-2.0248Y-0.2360Z-0.2720A-4.3624W3.1160F150
X-2.0161Y-0.2292Z-0.2480A-4.3512W3.1060F150
X-1.9848Y-0.2110Z-0.2237A-4.2840W3.0600F150
X-1.9452Y-0.1886Z-0.2051A-4.1886W2.9920F150
X-1.8972Y-0.1721Z-0.1837A-4.0712W2.9080F150
X-1.8402Y-0.1668Z-0.1603A-3.9424W2.8160F150
X-1.7661Y-0.1717Z-0.1930A-3.7912W2.7080F150
X-6.4470Y-0.7061Z-6.7722A-13.9160W8.9400F150
```

Fig.7 NC-program for piecewise method

Fig.8 The result of real grinding with NC-program for piecewise method

Fig.8 は、ボールエンドミル先端半球と切れ刃との距離を示したものである。また、実際の加工では、先端は削っていないため、ずれが大きくなっている。しかし、重要となる切れ刃は図中の矢印で示した範囲である。従って、最大距離が約 $2 \mu\text{m}$ となり、精度の向上を達成した。

7. 成果と今後の課題

成果

- 二つの曲面 R-2, R-gash をパラメトリック曲面の簡明な数式として導いた
- 既存の NC プログラムによる切れ刃を二つの曲面の交線として定義・算出した
- 区分方式の考案・実装により、シミュレーション結果と実際の加工結果の両方で精度の向上に成功した

今後の課題

- 区分数を増やし、2 回転軸 (A・W) の修正を行い、誤差曲線のうねりを小さくすること
- 異なる工具寸法にも対応した汎用性の高いシミュレーションプログラムにすること

参考文献

- [1] エンドミルのすべて、ツールエンジニア編集部、大河出版、1988 年
- [2] モータ代数とグラフ理論による機構の記述と解析 (第 1 報)、城 道介、精密工学会誌、1988 年
- [3] ボールエンドミルの高精度切れ刃生成用 NC プログラムの開発、藤澤大輔、平成 20 年度茨城大学修士論文、2009 年
- [4] FORTRAN 77 数値計算プログラミング (増補版)、森 正武著、岩波書店、1987 年