5 軸制御加工におけるボールエンドミルの 最適傾斜角決定方法*

——仕上げ面粗さを基準にした決定方法とニューラルネットワークの応用——

趙 曉明** 堤 正臣*** 是田規之† 葛 東方†† 陳 亮**

Determination of Optimum Tilting Angle of Ball-End Mill in 5-Axis Control Machining

—Determination Based on Finished Surface Roughness and Application of Neural Network—

Xiaoming ZHAO, Masaomi TSUTSUMI, Noriyuki KORETA, Dongfang GE and Liang CHEN

When machining a workpiece with a ball-end mill at high feed speed, the finished surface roughness is greatly affected by the tilting angle of the tool axis. In order to obtain fine surface roughness, this paper proposes concepts of optimum and critical tilting angles for unidirectional and bidirectional feed machining, respectively. The computer simulation demonstrates that the surface roughness can be dramatically improved by tilting the tool axis with an optimum tilting angle in the unidirectional feed machining and with a critical tilting angle in the bidirectional feed machining, as compared with the traditional three-axis machining. Furthermore, the surface roughness can also be improved by employing the unidirectional feed machining comprising with the bidirectional feed. To estimate desirable tilting angle under any machining condition, a neural network is used for learning the relationship between the machining conditions and the tilting angles. The effectiveness of the network for both optimum and critical tilting angles is also proved.

Key words: ball-end mill, surface roughness, 5-axis control, optimum tilting angle, neural network

1. 緒 言

自動車や家電製品用の金型の加工にはボールエンドミル(以下工具と略す)が一般的に使われる。金型は切削加工された後、表面粗さを小さくするために研磨工程を必要とするが、多くの場合研磨は人手を要することから能率が低く、全加工コストに占めるその割合が大きくなる。そのために研磨工程を省略したり、できるだけ短縮できるように、より小さな表面粗さの得られる加工法が望まれている。

従来は、図1に示すように、工具の1回転当たりの送り量が小さかったために送り方向の表面粗さは問題にならず、送り方向に対する直角方向、いわゆるピックフィード方向のカスプ¹⁾だけを考えればよかった。しかし、最近のように送りが高速になってくると送り方向の表面粗さがカスプよりも大きくなることもある²⁾。切れ刃の軌跡をもとに送り方向の幾何学的形状誤差、すなわち表面粗さを筆者の一人³⁾は解明した。しかし、この研究では図2(a)に示す双方向送りに対して削り残しが計算されているが、図2(b)に示す一方向送りは解明されていない。

ところで、5軸制御加工では工具軸を被加工面に対して傾ける、いわゆる傾斜加工が容易に行えるが、この場合、一方向送りでは工具摩耗が最小になる傾斜角に対する最適な送り速度⁴⁾の存在することが報告されている。しかし、一方向送りと双方向送りとの両切削方式において表面粗さが最小となるような傾斜角については検討されていない。

そこで本研究では工作物の被切削面を平面と仮定し、削り残しの山形の最大高さを表面粗さと定義して、文献3)で導かれた計算式をもとに両切削方式における表面粗さを検討したのち、より小さな表面粗さの得られる傾斜角の求め方を提案する。さらに、ニューラルネットワーク(Neural Network, 以下 NN と略す)を用いて、任意の条件下で切削を行ったときの表面粗さを最小にする工具軸傾斜角、すなわち最適傾斜角を決定する方法について明らかにする。

2. 表面粗さの解析方法

2.1 切れ刃の軌跡方程式

平面を切削した削り残しの山形を解析するために、工作物座標系 $O_W\text{-}XYZ$ と工具座標系 $O_T\text{-}UVW$ を図3のように定義した。工具座標系は工作物座標系をY軸の回りに傾斜角 β だけ回転していたものである。工具はW軸の回りに回転しながらY方向に送られ、間欠的にX方向にピックフィード量だけ移動させて、加工を行う。

文献3)によると、工作物座標系上における切れ刃上の任意の点 $P(x, y, z)$ は次式で与えられる。

Fig.1 Surface profile in low feed speed

* 原稿受付 平成7年11月22日

** 学生会員 東京農工大学大学院 (小金井市中町2-24-16)

*** 正会員 東京農工大学大学院

† 正会員 熊本工業大学 (熊本市池田4-22-1)

†† 正会員 東京農工大学

Fig. 2 Two types of feed

Fig. 3 Coordinate axes of tool and workpiece

Table 1 Cutting conditions

Tool radius	R	5 mm
Number of teeth		2 teeth
Feedrate	$f/2n$	0.5 mm/tooth
Pick feed	$P.F.$	0.5 mm

$$x = R \sin \alpha \cos(H + \theta) \cos \beta + \left(\frac{R-s}{\cos \beta} - R \cos \alpha \right) \sin \beta$$

$$y = R \sin \alpha \sin(H + \theta) + \frac{f\theta}{2\pi n}$$

$$z = R - s - R \sin \alpha \cos(H + \theta) \sin \beta - R \cos \alpha \cos \beta$$

ただし、 R ：工具半径 (mm)

α ： $O_T P$ と W 軸とのなす角 ($0 \leq \alpha \leq \pi/2$) (rad)

H ：各切れ刃と U 軸とのなす初期角度 (rad)

θ ：切れ刃の初期角度からの回転角 (rad)

f ：送り速度 (mm/min)

n ：回転速度 (min^{-1})

s ：切込み量 (mm)

である。二つの切れ刃を持つ工具に対して、 $f/2n$ は1刃当たりの送り量である。

2.2 表面粗さの解析方法

切削条件と工具の傾斜角を決めたのち、 $0 \leq \theta \leq 2\pi$ の範囲で切れ刃の軌跡を計算することによって、1回転当たりの送り量から削り残しが求められる。

一方向送りの場合、式(1)の x にピックフィード量を加えることによってもう一つの軌跡が求められ、式(1)と合わせて、隣り合う二つの送りの間における削り残しの山形が求められる。

双方向送りの場合、式(1)の x にピックフィード量を加えて、 y を式(2)のように修正し、式(1)と合わせて、隣り合う二つの送りの間における削り残しの山形を求めることができる。

Fig. 4 Simulation of surface profile in unidirectional feed

Fig. 5 Simulation of surface profile in bidirectional feed

$$y = R \sin \alpha \sin(H + \theta) + \frac{f(2\pi - \theta)}{2\pi n} \quad (2)$$

このようにして求めた削り残しの山形の最大値から表面粗さが決まる。

3. 最適傾斜角と臨界傾斜角

3.1 削り残しの検討

表1に示した切削条件下で一方向送りと双方向送りとの両切削方式に対して、傾斜角 β が 0° 、 2° 及び 20° のときの削り残しの形状と最大高さをシミュレーションした。その結果を図4と図5に示す。

表1の条件でシミュレーションしたときのカスプの高さは $6.3 \mu\text{m}$ であるのに対し、図4と図5から工具軸が切削面と垂直($\beta=0^\circ$)である垂直加工のとき工具の回転中心付近での削り残しはカスプよりも高く、 $25 \mu\text{m}$ の高さに達していることがわかる。この結果から図1に示したカスプよりも送り方向の削り残しが、表面粗さを悪化させる大きな原因であることがわかる。

図4と図5を詳細に調べると、二つの切れ刃を持つ工具の場合、送り方向では工具1回転当たりの送り量の $1/4$ と $3/4$ のところで削り残しが最も大きくなっているのがわかる。

工具1回転当たりの送り量の $1/4$ のところ、すなわち図4、図5の断面Sでの削り残しと傾斜角度 β との関係を調べると図6のようになる。図中の実線は双方向送り、破線は一方向送りにそれぞれ対応する。実線と破線の最大値はこの傾斜角 β での表面粗さになる。図示したように傾斜角 β の増大につれて両切削方法での削り残しの形状はほぼ相似になっているが、一方向送りの削り残しはつねに双方向送りよりも小さくなっていることから、一方向送りは双方向送りよりも表面粗さが小さくなるといえる。

Fig. 6 Surface profile at cross section S

Fig. 7 Relationship between tilting angle of tool axis and surface roughness

Fig. 8 Relationship between β and $d\Delta$

3.2 最適傾斜角と臨界傾斜角の定義

図6は工具半径 $R = 5\text{ mm}$ の結果であるが、工具半径 R を 5 mm , 10 mm 及び 15 mm としたときの表面粗さと傾斜角 β との関係 β を 0° から 50° まで 1° ごとに変えて計算して求

めた。その結果を図7に示す。

図7 (a)に示す一方送りの場合では、表面粗さは傾斜角 β が増大するにつれて急激に低下し、ある傾斜角 β_0 を超えると徐々に大きくなって一定値に収束する。この β_0 で表面粗さは最小値をとるので、 β_0 値を最適傾斜角、 β_0 値に対応する表面粗さ Δ_0 を最小表面粗さとそれぞれ呼ぶことにする。

ところが、双方向送りの場合図7 (b)に示すように表面粗さはある傾斜角 β_c まで急激に減少し、それ以降は徐々に小さくなって一定値に近づく。この β_c 値を臨界傾斜角、 β_c 値に対応する表面粗さ Δ_c を臨界表面粗さとそれぞれ呼ぶことにする。

3.3 最適傾斜角と臨界傾斜角の取り方

削り残しの山形と表面粗さは傾斜角 β によって変化することがわかるが、その関係を定式化することは難しい。そのために図7に示した表面粗さは傾斜角 β を 0° から 50° まで 1° ごとに変えて求めた。ここで、図7 (a)に示した一方送りの場合、求めた51個の表面粗さの値の中で最小値をとる傾斜角を最適傾斜角 β_0 、最小値をとる表面粗さを最小表面粗さ Δ_0 とする。もしその関係が定式化できれば、最適傾斜角は表面粗さの微分がゼロであるという条件で正確に求められるが、以上の方法で求めた最適傾斜角 β_0 とは 1° 以内の差になるため、最適傾斜角 β_0 と臨界傾斜角 β_c との許容誤差をそれぞれ 1° とする。

図7 (b)に示した双方向送りの場合、表面粗さは傾斜角が増大するにつれて小さくなっていくので、より小さな表面粗さを得るためにはより大きな傾斜角をとるほうがよい。しかし、一般的に傾斜角が増大するにつれて、切削抵抗の工具軸方向成分に対して、工具を曲げる成分が相対的に大きくなり、より大きな工具のたわみを起こすので、できるだけ傾斜角を小さくするほうがよい。そこで、表面粗さをあまり大きくせずに、できるだけ小さな傾斜角を臨界傾斜角 β_c とすることにした。

ここで、傾斜角 β_i と β_{i+1} における表面粗さをそれぞれ Δ_i と Δ_{i+1} とし、傾斜角 β_i における表面粗さの変化率 $d\Delta_i$ を $(\Delta_i - \Delta_{i+1})/\Delta_i$ と定義する。図7 (b)に示した双方向送りの表面粗さの変化率 $d\Delta$ を図8に示す。変化率は図に示す Δ 印の位置から右側の部分では変化は小さいといえる。そこで工具のたわみをできるだけ小さくすることを考慮し、本研究では便宜上、この変化率 $d\Delta$ が 0.01 以下になる傾斜角 β_i を臨界傾斜角 β_c 、 Δ_i を臨界表面粗さ Δ_c とすることにした。なお、このように定義して求めた β_c よりも 1° 大きい ($\beta_c + 1^\circ$) における表面粗さと Δ_c との差は $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下であり、ほとんど差がないことは計算で確かめている。

3.4 切削方式の比較

図7から、一方送りの場合工具を最適傾斜角 β_0 に、双方向送りの場合工具を臨界傾斜角 β_c に傾けて切削を行うと、表面粗さは垂直加工よりかなり改善できることがわかった。ここで、垂直加工と傾斜加工の表面粗さの差を垂直加工の表面粗さで割った値を、傾斜加工の表面粗さの改善率と定義する。図7に示した最適傾斜角、臨界傾斜角、最適傾斜角と臨界傾斜角による表面粗さの改善率などを表2に示す。表2か

Table 2 Improvement of surface roughness

	Unidirectional feed			Bidirectional feed		
	5	10	15	5	10	15
Tool radius R mm						
Surface roughness at tilting angle $\beta=0^\circ$ μm	24.8	12.4	8.3	25.0	12.5	8.3
β_0 or β_c $^\circ$	4	2	1	13	8	7
Δ_0 or Δ_c μm	8.7	4.3	3.1	13.4	6.5	4.3
Improvement of surface roughness %	64.9	65.3	62.7	46.4	48.0	48.2
Average improvement of surface roughness %	64.3			47.5

Fig.9 Neural network's structure

Table 3 Minimum surface roughness and optimum angle in unidirectional feed at different cutting conditions

$f/2n$ P.F.	0.3			0.5			0.7			0.9			1.1		
	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
0.3	2.8(2)	1.4(1)	1.0(1)	3.9(2)	2.0(1)	1.5(1)	5.2(3)	2.7(1)	1.9(1)	6.1(3)	3.5(1)	2.5(1)	7.0(3)	4.3(1)	2.9(1)
0.5	6.7(3)	3.6(2)	2.2(1)	8.7(4)	4.3(2)	3.1(1)	9.7(4)	4.8(2)	3.5(1)	10.9(4)	5.4(2)	4.3(1)	12.0(4)	6.0(2)	5.1(1)
0.7	12.4(4)	6.4(2)	4.3(2)	14.0(5)	7.3(3)	4.9(2)	15.8(5)	8.2(3)	5.5(2)	17.2(5)	9.3(3)	6.2(2)	18.8(5)	10.2(3)	6.8(2)
0.9	20.1(6)	10.0(3)	6.7(2)	21.9(6)	11.0(3)	7.3(2)	23.6(6)	11.8(3)	7.9(2)	25.2(6)	12.6(3)	8.4(2)	26.8(6)	13.4(3)	8.9(2)
1.1	29.7(7)	15.0(4)	10.1(3)	31.4(7)	15.8(4)	10.6(3)	32.7(7)	16.9(4)	11.7(3)	34.7(7)	18.3(4)	12.5(3)	36.8(7)	19.4(4)	13.2(3)
Average improvement of surface roughness 47.3%															

$f/2n$: Feedrate (mm/tooth); R : Tool radius (mm); $P.F.$: Pick feed (mm); (): Optimum angle ($^\circ$)

Table 4 Critical surface roughness and critical angle in bidirectional feed at different cutting conditions

$f/2n$ P.F.	0.3			0.5			0.7			0.9			1.1		
	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
0.3	4.7(10)	2.3(7)	1.5(6)	9.4(14)	4.5(9)	2.9(8)	16.8(18)	7.9(12)	5.1(10)	24.2(22)	12.6(14)	8.2(12)	31.0(25)	16.4(16)	11.4(14)
0.5	8.7(9)	4.3(6)	2.8(6)	13.4(13)	6.5(8)	4.3(7)	20.5(17)	9.8(11)	6.4(9)	30.4(21)	14.3(14)	9.3(11)	44.3(24)	20.7(15)	13.1(13)
0.7	14.9(8)	7.3(5)	4.8(5)	19.7(12)	9.5(8)	6.3(6)	26.8(16)	12.8(11)	8.5(8)	36.6(20)	17.3(13)	11.2(11)	49.6(23)	23.5(14)	15.1(12)
0.9	23.7(7)	11.3(5)	7.5(4)	27.8(12)	13.6(7)	9.0(6)	34.9(16)	16.7(11)	11.1(8)	45.2(19)	21.3(13)	14.0(10)	58.1(22)	27.7(13)	9.89(2)
1.1	34.5(6)	16.8(4)	10.8(4)	39.0(11)	19.1(6)	12.4(5)	46.0(15)	22.0(10)	14.6(7)	56.1(18)	26.5(12)	17.2(10)	69.3(21)	32.8(13)	21.3(10)
Average improvement of surface roughness 38.5%															

$f/2n$: Feedrate (mm/tooth); R : Tool radius (mm); $P.F.$: Pick feed (mm); (): Critical angle ($^\circ$)

ら次のことがいえる。

(1) 一方向送りの最適傾斜角は双方向送りの臨界傾斜角より小さいので、工具のたわみがより小さくなる。

(2) 一方向送りの最適傾斜角による表面粗さの改善率の平均値は、双方向送りの臨界傾斜角による表面粗さの改善率の平均値より大きい。

したがって、一方向送りは工具のたわみと表面粗さとの両方でも双方向送りより良好であるといえる。

4. NN による最適傾斜角と臨界傾斜角の推定

前章から一方向送りの場合に工具を最適傾斜角に、双方向送りの場合に工具を臨界傾斜角に傾けて切削を行うと、より小さな表面粗さが得られることがわかるが、その最適傾斜角 β_0 と臨界傾斜角 β_c は、傾斜角 β を 1° ごとに変えて計算して求めた。

ところで、使用する工具の半径 R 、ピックフィード $P.F.$ 、及び送り量 $f/2n$ は対象とする工作物によって変わるので、それに対応した β_0 や β_c をいちいち求めるのは合理的ではない。そこで、任意の切削条件に対応できる β_0 や β_c を速やかに求める方法について検討することにした。

4.1 NN の導入と学習データ

最近、入出力の定式化が困難な問題に対して、NN が利用されるようになってきた。すでに述べたように金型加工に限らず実際に採用される切削条件は様々であり、 β_0 や β_c の定式化は困難であるので、NN を利用することによって求めることを考え、その有効性を確認することにした。

切削条件と β_0 及び β_c との関係は幾何学的に定まる静的なものであることから階層型フィードフォワード法に基づいて開発した NN⁵⁾ を使用することにした。その構造は図9に示すとおりである。

図に示すように、 $f/2n$ 、 $P.F.$ 及び R を入力とし、 β 及び Δ を出力とする4層の NN を採用した。第1層と第4層とを直線関数、第2層と第3層とをシグモイド関数で表した。それぞれのニューロンの数は図に示すように、10、20、10、1とした。なお、 $\hat{W}_1 \sim \hat{W}_4$ は結合荷重、 $\hat{B}_1 \sim \hat{B}_4$ はバイアス値である。この NN の学習にはバックプロパゲーション学習アルゴリズム⁶⁾を使用した。

図9に示した NN を使うまえに学習データを作成した。その結果の1例を表3及び表4に示す。この二つの表では、いずれもピックフィード量 $P.F.$ を 0.3 mm から 1.1 mm まで 0.2 mm きざみに、1 刃当たりの送り量 $f/2n$ を 0.3 mm から 1.1 mm

Fig. 10 Estimated error of angle

Fig. 11 Estimated error of surface roughness

まで0.2 mm きざみに、そして工具の半径 R を 5 mm, 10 mm, 15 mm と変えて、表面粗さを求めた値を示してある。表 3 の () 内には β_0 の値を、表 4 の () 内には β_c の値をそれぞれ示した。なお、これらの表には一方向送りと双方向送りの二つの場合の表面粗さの改善率の平均値も示してある。

表 3 及び表 4 に示した (β_0, Δ_0) 及び (β_c, Δ_c) を教師データとして図 9 に示す NN に学習させた。学習回数は 4000 回程度である。

4.2 NN の推論結果

未学習のピックフィード、送り速度及び工具半径において、学習済みの NN の出力と解析による値とを比較した。その結果を図 10 と図 11 に示す。図 10 は、未学習の条件、 $P.F.$ 、 $f/2n$ 及び R に対する β_0 や β_c の推論結果と解析によって求めた結果との差を示してある。これらの図に示すように推論した β_0 及び β_c の値はいずれも解析で求めた値よりもわずかに大きい、その推論誤差は 1° よりも小さいことがわかる。同様に Δ_0 や Δ_c の推論誤差は $2 \mu\text{m}$ よりも小さくなっている。以上に示したように、最適傾斜角 β_0 と臨界傾斜角 β_c との推論誤差は 1° 以内であるため、前章で規定した許容誤差 1° 以内の要求を満足しており、NN を利用した最適傾斜角と臨界傾斜角の推論方法は有効であるといえる。

5. 結 言

本研究ではボールエンドミルによる平面加工時の表面粗さを検討し、一方向送りの場合の最適傾斜角と双方向送りの

場合の臨界傾斜角の概念をそれぞれ示して、最適傾斜角と臨界傾斜角、最適傾斜角による表面粗さの改善率と臨界傾斜角による表面粗さの改善率をそれぞれ比較した。さらに、ニューラルネットワークを利用して任意の切削条件下における最適傾斜角と臨界傾斜角の求め方を提案し、その有効性を確認した。得られた主な結果を要約すると次のようになる。

- (1) 一方向送りの場合には工具を最適傾斜角に、双方向送りの場合には工具を臨界傾斜角に傾けて切削を行うと、表面粗さは垂直加工の場合より小さくなる。
- (2) 一方向送りの場合の工具軸の傾斜角は双方向送りよりも小さくでき、しかも表面粗さが小さくなる。

参 考 文 献

- 1) 佐田登志夫, 大越 諄: 切削仕上げ面の粗さ, 科学研究所報告, 33-5 (1957) 295.
- 2) 阿部忠之: 自動車用金型の高品位型彫り加工の実験, 第 20 回工作機械関連技術者会議, 7 (1990) B1-3-1.
- 3) 是田規之, 江川庸夫, 黒田基文, 渡部 健, 伊井良治: ボールエンドミル加工における表面粗さの生成過程の解析, 精密工学会誌, 59, 9 (1993) 1537.
- 4) 高津戸光雄, 貴志浩三: ボールエンドミルによる傾斜最適送りの実現, 日本機械学会論文集, 56, 521, C (1990) 189.
- 5) 陳 亮, 堤 正臣, 葛 東方, Antonio Moran: 自律制御システムによる CNC 工作機械の送り駆動精度の安定化手法——ニューラルネットワークを使用した手法, 日本機械学会論文集, 61, 591, C (1995) 382.
- 6) R. Hecht-Nielsen: Neurocomputing, (1990). (袋谷賢吉訳: ニューロコンピューティング, トッパン, 1992, pp. 162-178)