



Title	数値制御工作機械による3軸制御加工と離散化誤差：第2報 離散化された工作物形状に対する工具経路と加工誤差
Author(s)	小島, 龍広; 西田, 知照; 扇谷, 保彦
Citation	長崎大学工学部研究報告 Vol.31(57) p.7-14, 2001
Issue Date	2001-07
URL	http://hdl.handle.net/10069/5150
Right	

This document is downloaded at: 2020-10-20T06:50:43Z

数値制御工作機械による3軸制御加工と離散化誤差 (第2報：離散化された工作物形状に対する工具経路と加工誤差)

小島 龍広*・西田 知照*・扇谷 保彦*

Three-axis Control Processing Using NC Machine Tools and Discrete Treatment Error (2nd Report : Tool Path for Discrete Work Shape and Machining Error)

by

Tatsuhiko KOJIMA*, Noriteru NISHIDA*
and Yasuhiko OUGIYA*

In this report, the work shape is supposed as a polyhedron constructed by many sides connecting adjacent discrete points with lines. The summary of tool path calculation method using TSMM (Tangent Slope Matching Method proposed in our previous report) is described. One side slope method and two side slope method are shown as the utilization of tangent slope information of work. The tool path calculated by one side slope method causes machining error. This machining error (over-cut) is estimated theoretically. A work with half cylinder surface is cut by a ball end mill cutter using one side slope method and two side slope method. The machined surface of work is measured by CNC three-dimensional coordinate measurement equipment and compared with the theoretical shape.

1. 緒 言

近年、製造分野における製品のライフサイクルはますます短縮化され、金型などの複雑な曲面形状を持つ機械部品の高速度・高精度加工が要求されている。複雑な形状になると4～5軸の多軸制御加工を必要とする。多軸制御になるとCAMの支援が不可欠であるが、現在、工具経路算出、工具姿勢の決定、干渉チェックなどのすべてが完全に解決されているわけではない。

CADで自由曲面を作成する場合、全体を一つの数式で表せない場合が多く、スプラインやNURBSなどの関数補間を用いて表現される。一方、現在のNC装置は、NURBS補間指令を用いた制御装置が開発されてはいるが、大部分のNC工作機械は直線補間指令により加工が行われる。NC装置がCADで定義された関数を用いた制御が可能ならば、設計値通りの理想的な曲面が得られるはずであるが、データ点とデータ点の間は直線補間運動となり工具の運動は微少な直線運動の集合となる。従って、CAMでNCデータを作成する

場合、工作物形状を格子状の離散点データとして定義し、工具経路が算出されることが多い。

解析的手法を基礎とした、等勾配法による5軸制御加工に関するアルゴリズムを確立し^{1)~3)}、すでに3軸制御加工時の工具経路算出法を報告した⁴⁾。金型曲面加工では工具にボールエンドミルが主に用いられるが、等勾配法ではボール形状以外の任意形状を使用することができ、工具輪郭上の切削点を指定した加工が可能である。

前報告⁵⁾では、離散形データに基づく解析的な工具経路算出法(順行程)、および得られた工具経路によって加工される工作物座標点の算出法(逆行程)を示した。順行程で与えられた工作物座標点と逆行程で算出された工作物座標点の差(戻り誤差)から、工作物形状及び工具運動経路がもつ勾配情報の利用方法を評価した。工作物形状の勾配情報として二辺勾配法を用いれば戻り誤差は小さいが、一辺勾配法を用いた場合には格子間隔や工具径などの影響を受けて戻り誤差は大きくな

平成13年4月20日受理

*機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

る。このために、直線補間運動により切削された工作物には削り過ぎや削り残しなどの加工誤差が生じる。

本報告では、3軸制御加工を対象として、工作物形状が離散化された場合の加工誤差の算出法を述べる。また、加工誤差の計算例と実際に行った加工実験の結果を示す。

2. 従来の工具オフセット面算出法と加工誤差

工作物形状が切削加工により創成される形状は、工具輪郭がその運動によって作り出す包絡面である。従って、曲面加工では工具輪郭が作る包絡面が、要求された工作物曲面と一致するように工具運動経路を定めるようにしなければならない。

工具オフセット面の算出法として、逆オフセット法⁴⁾が広く用いられている。この方法は、逆向き工具の原点を工作物表面形状に沿って移動させたとき、工具輪郭が作る包絡面が工具オフセット面である。しかし、この包絡面の解析的算出は困難である。

図1(a)は逆オフセット法における工具オフセット点の算出原理を示している。点A,B,C,Dは、工作物形状上に等ピッチで取られた点である。逆向き工具の原点を点A,B,C,D上に置いたとき、得られたオフセット点が点a,b,c,d(●印)である。逆向き工具が作る包絡面の正しい点は点aおよび○印の点である。

図1(b)は、求められた工具オフセット点a,b,c,d上に工具原点を配置した場合、工具が工作物に食い込んでいる様子を示している。ピッチを小さくすればこの食い込み量は小さくできるが、与えられた工作物表面点を削り過ぎる加工誤差は避けられない。

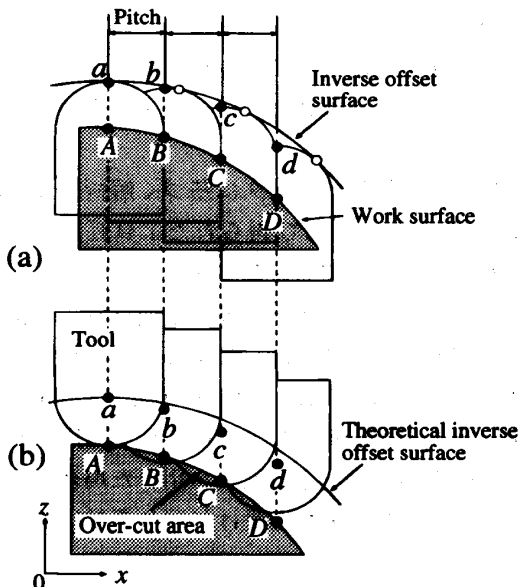


Fig. 1 Machining error caused by Inverse offset method

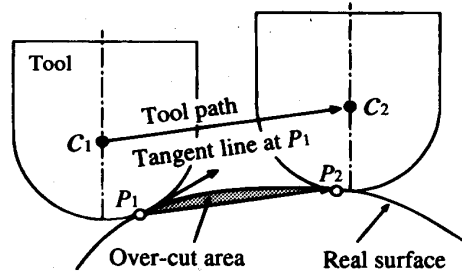


Fig. 2 Error caused by tool motion

図2は工具運動によって生じる加工誤差を示している。点 P_1, P_2 を加工点とする。点 P_1, P_2 は工作物座標点と同時に工具切れ刃上の切削点でもある。工具が動かなければ点 P_1, P_2 は正しく削られる。しかし、直線補間運動により工具原点が点 C_1 から点 C_2 へ移動した場合、工具運動勾配は線分 C_1C_2 となり、切削点 P_1 は、線分 C_1C_2 と等しい勾配で工具が運動し切削が行われる。従って、図中に示す削り過ぎが生じる。要求された加工面を正しく削り出すためには、工具運動の方向は点 P_1 における接線方向と一致していなければならない。

すなわち、従来の手法では、工具オフセット面算出の際の近似誤差と運動誤差の二つの誤差が存在していることが分かる。

3. 工作物形状勾配の利用方式と等勾配法による工具経路の算出

図3に3軸制御加工の工作物座標系 $x-y-z$ と工具座標系 $\xi-\zeta-\eta$ の関係を示す。工作物座標系 $x-y-z$ は固定座標系とする。工具座標系 $\xi-\zeta-\eta$ は工具の運動と共に動く運動座標系である。工具切れ刃上の任意の一点 $P(r, \eta, \theta)$ の座標を、工具軸断面の輪郭 r, η および工具軸回りの回転角 θ で表す。工具座標系の原点 O_c は工具先端にとり、この工具原点 O_c の工作物座標系での位置を (o_x, o_y, o_z) で表す。

等勾配法の原理は、工具が工作物を創成する瞬間における創成点(工具輪郭形状、工作物形状、工具運動経路上の3点)での三つの接平面が完全に一致するという性質を利用することにある⁴⁾。すなわち、工具輪郭上の任意の一点における接平面と工作物上の任意の

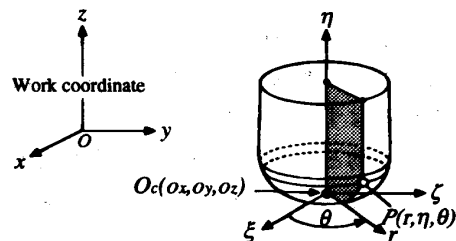


Fig. 3 Relationship between work coordinate $x-y-z$ and tool coordinate $\xi-\zeta-\eta$

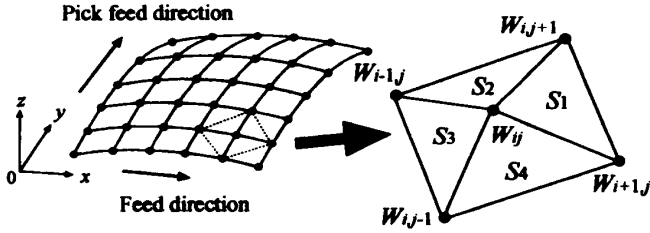


Fig. 4 Discrete work surface defined by polyhedron

一点における接平面が一致した場合、その工具輪郭上の点は工具運動経路上の点となる。

関数形曲面に対する等勾配法の処理手法は、まず、工作物上のある一点についてその接線勾配から工具輪郭上の切削点を算出し、次にその切削点と工作物表面点とが接触するように工具位置を決める。この手法において、与えられた関数形曲面を正しく削り出すための前提条件は、工具上の切削点の運動方向が工作物表面上の点の接線方向と一致することである。直線補間運動では工作物上の一点と隣の点ではその接線方向が変わる。本来はこの二点の間では、工具の運動も工作物の曲線に合わせて連続的に変化させる必要がある。従って、関数形曲面を正しく削り出すためには、工具の運動は曲線補間運動でなければならない。

本報告では、工具の直線補間運動を前提とし、工作物形状は、図4に示すように離散点間を直線で結んだ多面体と見なす。図の*i*および*j*方向はそれぞれフィード方向およびピックフィード方向とする。工作物上の表面点 W_{ij} は $S_1 \sim S_4$ の4つの平面が交わる尖点である。すなわち、離散化された工作物表面上の全ての点を、フィード方向およびピックフィード方向のそれぞれに対して二つの辺の勾配を持つ尖点と考える。工作物形状の勾配情報として、関数で表される連続形の場合は関数の偏導関数を利用することができるが、離散化された場合は偏導関数を利用することができない。そこで、離散点間の差分値を用いて勾配情報を表すことにする。また、与えられた工作物表面上の一点に対し、一つの工具位置が対応するようにする。

工作物形状が離散化された場合の工具経路算出法は、文献5で示したので算出式の要点のみを述べる。図5に離散化された工作物の*x-y*表面を示す。三角形 S_1 で表される面の*x-y*軸方向についての接線の勾配 T_{wx}, T_{wy} は、差分形式で表すと式(1)となる。

$$T_{wx} = \frac{\Delta w_y^j \Delta w_x^j - \Delta w_y^i \Delta w_x^i}{\Delta w_x^j \Delta w_y^j - \Delta w_x^i \Delta w_y^i} \quad (1)$$

$$T_{wy} = \frac{\Delta w_x^j \Delta w_z^j - \Delta w_x^i \Delta w_z^i}{\Delta w_x^j \Delta w_y^j - \Delta w_x^i \Delta w_y^i}$$

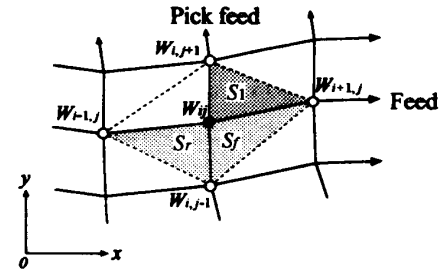


Fig. 5 Feed and pick feed directions on discrete work surface

ただし、 Δw_x^i はフィード方向の*x*の差分値である。式(1)で表される接線勾配 T_{wx}, T_{wy} は、工作物上の点 $W(w_x, w_y, w_z)$ における接平面の*x-z*断面および*y-z*断面における傾きである。すなわち、接線勾配 T_{wx}, T_{wy} によって工作物上の点 $W(w_x, w_y, w_z)$ に関する接平面が決定づけられる。これらの工作物に関する接平面情報を工具経路算出の際に利用する。

式(1)で表される工作物勾配を利用する方法を一边勾配法と呼ぶ。この場合図6(a)のように工作物上の点*i*と点*i+1*の二点間の線分*A*の勾配と、工具輪郭上の点の勾配が一致する点 $P_c(r, \eta)$ が切削点となる。一边勾配法の工具原点 $O_c(o_x, o_y, o_z)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} o_x &= w_x - r \cos \theta \\ o_y &= w_y - r \sin \theta \\ o_z &= w_z - \eta \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{T_{wy}}{T_{wx}} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dr}{d\eta} = T_\eta = \frac{1}{\sqrt{T_{wx}^2 + T_{wy}^2}} \quad (4)$$

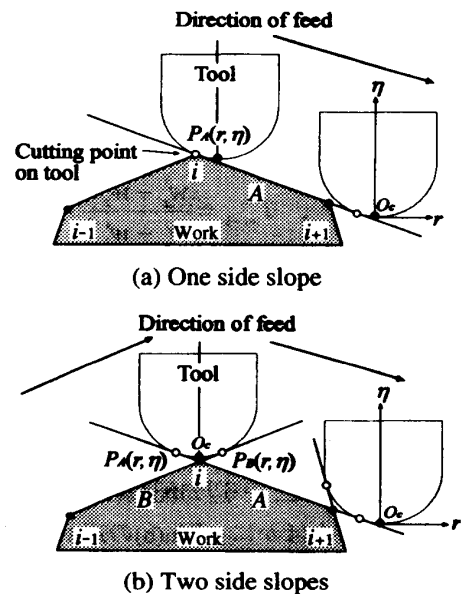


Fig. 6. Utilization of tangent slope of work

式(4)の $dr/d\eta$ は運動座標系である工具座標系で表した工具勾配であり T_η で表す。また、工具輪郭は工具半径 R 、コーナー半径 r_s をパラメータとするラジラスエンドミルについて定義すると工具輪郭 r 、 η は式(5)、(6)で表すことができる。

$$r = R - r_s + \frac{r_s}{\sqrt{1+T_\eta^2}} \quad (5)$$

$$\eta = r_s - r_s \sqrt{\frac{T_\eta^2}{1+T_\eta^2}} \quad (6)$$

同様に、図5の三角形 S_1 と三角形 S_2 の二つの三角形の勾配を利用する方法を二辺勾配法と呼ぶ。三角形 S_1 に対する接線勾配は式(7)で表され、三角形 S_2 に対する接線勾配は式(8)で表される。

$$T_{wyf} = \frac{\Delta W_y^j \Delta W_z^{j-1} - \Delta W_y^{j-1} \Delta W_z^j}{\Delta W_x^{j-1} \Delta W_y^j - \Delta W_x^j \Delta W_y^{j-1}} \quad (7)$$

$$T_{wxf} = \frac{\Delta W_x^{j-1} \Delta W_z^j - \Delta W_x^j \Delta W_z^{j-1}}{\Delta W_x^{j-1} \Delta W_y^j - \Delta W_x^j \Delta W_y^{j-1}} \quad (7)$$

$$T_{wxf} = \frac{\Delta W_y^{j-1} \Delta W_z^{j-1} - \Delta W_y^{j-1} \Delta W_z^j}{\Delta W_x^{j-1} \Delta W_y^{j-1} - \Delta W_x^{j-1} \Delta W_y^j} \quad (8)$$

$$T_{wxf} = \frac{\Delta W_x^{j-1} \Delta W_z^{j-1} - \Delta W_x^{j-1} \Delta W_z^j}{\Delta W_x^{j-1} \Delta W_y^{j-1} - \Delta W_x^{j-1} \Delta W_y^j} \quad (8)$$

二辺勾配法は、図6(b)に示すように、工具切れ刃を線分Aに対する切削点 $P_A(r, \eta)$ と線分Bに対する切削点 $P_B(r, \eta)$ の二つの切削点に同時に接触させた時の工具位置 O を工具原点とする。二辺勾配法の工具原点は次式で表される。

$$o_x = w_x - \frac{T_{wi} a_i - T_{wi-1} a_{i-1} + c_{i-1} - c_i}{T_{wi} - T_{wi-1}} \quad (9)$$

$$o_y = w_y$$

$$o_z = w_z - \frac{T_{wi} T_{wi-1} (a_i - a_{i-1}) + T_{wi} c_{i-1} - T_{wi-1} c_i}{T_{wi} - T_{wi-1}} \quad (9)$$

ここで、

$$T_{wi} = \frac{w_z^{j+1} - w_z^j}{w_x^{j+1} - w_x^j}, \quad T_{wi-1} = \frac{w_z^j - w_z^{j-1}}{w_x^j - w_x^{j-1}}$$

$$a = r \cos \theta, \quad b = r \sin \theta, \quad c = \eta$$

この手法は、尖点処理法としてすでに提案したが¹⁾、離散形曲面を表している全ての点を正しく削りだすことができる。

本報告では、離散化された工作物形状に関する勾配情報の利用方法として、一辺勾配法と二辺勾配法について検討する。このほかに、図6(b)の辺A、辺Bの勾配の平均値を利用する方法も考えられる。

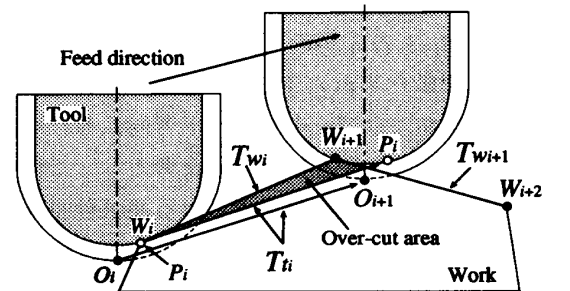
4. 加工誤差の算出

図7(a)は、工作物形状勾配として一辺勾配法を用いた場合に削り過ぎが生じる様子を示している。図の工作物座標点 W_i と W_{i+1} の工作物勾配を T_{wi} とする。座標点 W_i に対する工具原点 O_i は、工作物勾配 T_{wi} に等しい工具輪郭勾配点 P_i （工作物座標点 W_i と等しい）が切削点となる。同様に、工作物座標点 W_{i+1} と W_{i+2} の工作物勾配を T_{wi+1} とする。工作物勾配 T_{wi+1} と工具輪郭勾配が等しくなる位置で、座標点 W_{i+1} に対する工具原点 O_{i+1} も定まる。工具原点 O_i から O_{i+1} へ直線補間運動によって切削が行われる場合、工具運動勾配は T_{ti} となり、工作物勾配 T_{wi} とは等しくない。この結果、座標点 W_i の切削点 P_i が工具運動勾配 T_{ti} で直線補間運動をし、座標点 W_{i+1} の工具輪郭点 P_i まで進み、図の削り過ぎを起こす。

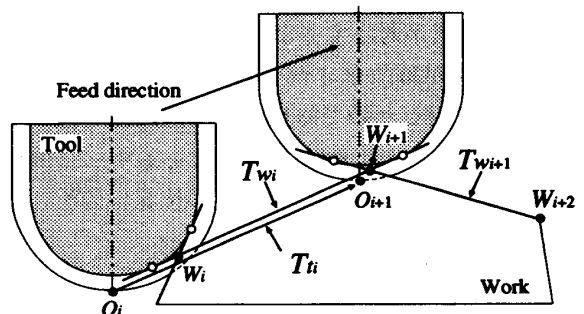
図(b)の二辺勾配法を用いた場合には、工作物座標点 W_i に対する工具原点 O_i と、座標点 W_{i+1} に対する工具原点 O_{i+1} の工具運動勾配 T_{ti} は、工作物勾配 T_{wi} と完全に一致するので加工誤差は生じない。従って、加工誤差の算出式は一辺勾配法の場合についてのみ示す。

4.1 一辺勾配法を用いた場合の加工誤差算出

図8に、凸面の場合の加工誤差を示す。工作物座標点 W_i と W_{i+1} のフィード方向の x の差分値を Δw_x^j 、 z の差分値を Δw_z^j とする。工具運動勾配 T_{ti} と工作物勾配 T_{wi} が異なるために、座標点 W_{i+1} において図の δ だけ削り過ぎとなる。このフィード方向に対する z 軸方向の削り過



(a) One side slope



(b) Two side slopes

Fig. 7 Tangent slope of tool motion for one side slope and two side slopes

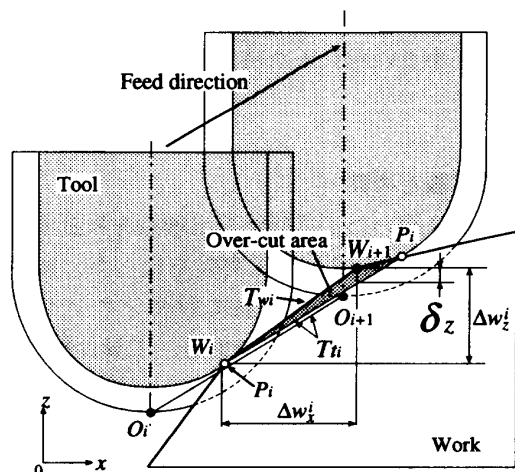


Fig. 8 Error for convex surface caused by one side slope utilization

ぎを加工誤差と定義する。δ_zは次式で表される。

$$\delta_z = \Delta w_x^i - \Delta w_x^i T_{Ti} \tag{10}$$

ここで、

$$T_{Ti} = \frac{o_z^{i+1} - o_z^i}{o_x^{i+1} - o_x^i}$$

$$\Delta w_x^i = w_x^{i+1} - w_x^i, \Delta w_z^i = w_z^{i+1} - w_z^i$$

すなわち、一辺勾配法を用いて直線補間運動により切削された加工面の工作物勾配は工具運動勾配と等しくなる。このために、本来の工作物勾配との差が生じ削り過ぎの原因となる。

4. 2 加工誤差の数値計算例

工作物形状が図9の半円柱凸面の場合について、一辺勾配法を用いた場合に生じる加工誤差の計算例（5章の加工実験でも同じ形状を切削する。）を示す。図10は、工作物半径Wr=50mmで、格子間隔がΔf=10° (=8.716mm)とした場合の半円柱凸面の離散点データである。工具半径R=5mmのボールエンドミルを用いて切削した場合に、φ = -10°の工作物座標点が削り過ぎとなる加工誤差δ_zを示す。座標点W_i (φ_i = -20°)とW_{i+1} (φ_{i+1} = -10°)との工作物勾配T_{wi}は15°である。それぞれの座標点に対する工具原点を式(2)を用いて算出し、工具運動勾配T_{Ti}を求めると14.545°となる。フィード方向のxとzの差分値を式(10)に代入し、加工誤差δ_zを求めると0.071mmとなる。

図11は、同様に半円柱凸面の場合について、工作物格子間隔Δf、工具半径R、工作物半径Wrを変化させた場合の加工誤差を示す。この図における加工誤差はすべて削り過ぎの大きさである。図11(a)は、工具半径をR=5mmの一定値とし、格子間隔Δfを0.1mmから1mmまで変化させた場合の誤差を示す。図中、○は

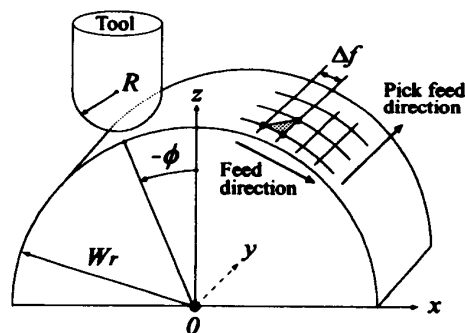


Fig. 9 Example of convex half cylinder

工作物半径Wr=50mmであり、△は同じくWr=100mm、□はWr=150mmの場合の誤差である。このグラフより、工作物半径が小さくなるほど格子間隔の影響を受けて誤差は大きくなることが分かる。また工作物半径がWr=50mmより大きい場合には、格子間隔を1mm以下にすれば、削り過ぎは1μm以下であり、一辺勾配法でも誤差はかなり小さい。図11(b)は、(a)と同じ条件で、格子間隔をさらに大きくとり、1mmから、10mmまで変化させた結果を示す。格子間隔が10mmと大きくなると多角形状になるが、Wr=50mmでは誤差が100μmにも達し格子間隔の影響を大きく受ける。図11(c)は、格子間隔をΔf=10mmの一定値とし、工具半径Rを変化させた場合の誤差を示す。このグラフより、工具半径が大きくなるほど誤差は大きくなる。また、工作物半径が小さいほど工具半径の影響を受けて誤差は大きくなる。図11(d)は、格子間隔をΔf=10mmの一定値とし、工作物半径Wrを変化させた場合の誤差を示す。この場合も、工作物半径が小さいほど、また工具半径が大きほど誤差が大きくなる。

また、今回は計算結果を示さなかったが、工作物座標点の前後二辺の勾配の平均値を用いる平均勾配法の誤差は、一辺勾配法の誤差の約半分程度であり、二辺勾配法のように完全に誤差を無くすことはできない。また、ピックフィード方向における誤差は、工具断面形状が格子間隔ごとに現れる、いわゆるカスプが

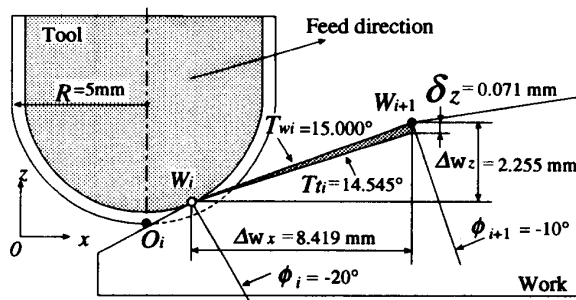
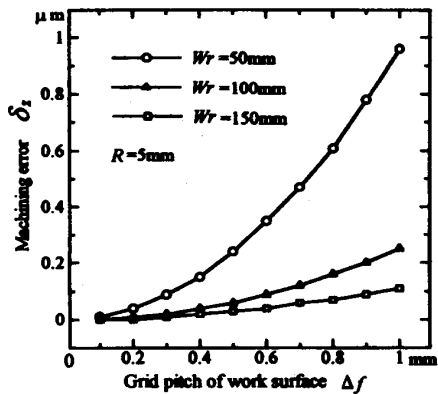
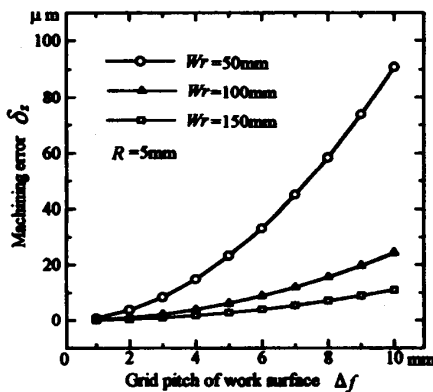


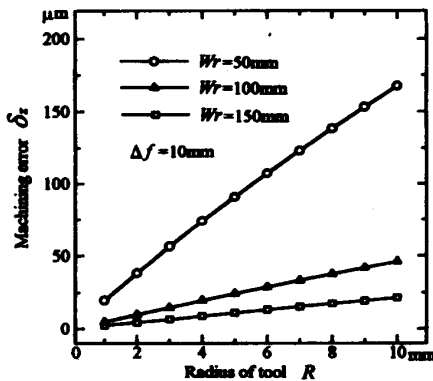
Fig. 10 An example of over-cut for a point on convex half cylinder (Wr=50mm, Δf=10°, φ=-10°)



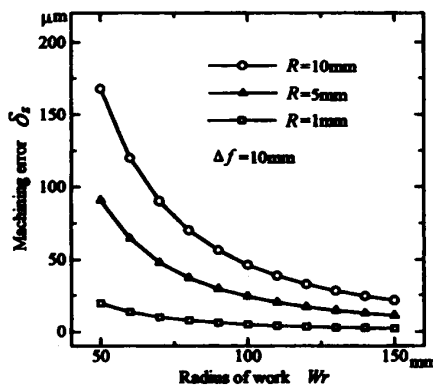
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.11 Error for convex half cylinder

形成されるが、工作物勾配を一定と考えた場合には、工具半径が小さい程、また格子間隔が大きい程誤差は大きくなる。

5. 加工実験と考察

等勾配法を用いた工具経路算出理論を検証するために、NCデータを作成し加工実験を行った。使用したNC工作機械は、3軸制御立て形マシニングセンタ(森精機製作所製, MV-jr)である。工具はR5の超硬ソリッドボールエンドミル(4枚刃)を用いた。加工精度は、CNC3次元座標測定機(東京精密製, ザイザックスVA600G)を用いて測定し、設計値からの偏差を評価した。

加工実験は、まず使用したNC工作機械の加工精度を調べるために基礎実験を行い、次に図14の加工形状を切削して仕上げ面の精度を評価した。

5. 1 使用機械の加工精度を調べる基礎実験

マシニングセンタの加工精度を悪化させる主な要因として、主軸の振れ、x,y,z軸の位置決め精度、送りネジのバックラッシュなどが挙げられる。また使用した工具はボールエンドミルであるが、工具切れ刃輪郭は完全な半円弧の形状には作られていない。そこで、運動誤差を持つ工作機械と切れ刃輪郭誤差を持つ工具を用いて加工した場合の仕上げ面の形状精度を調べることにした。切削条件を主軸回転数8000rpm, 送り200mm/min, 仕上げ加工時の切り込み深さを0.2mmとし、図12に示すように、工具半径分だけ切り込み、y軸方向をフィード方向にして加工した。被削材には被削性の良いケミカルウッドを用いた。測定は、3次元測定機で仕上げ面の(1)真円度と(2)形状精度をそれぞれ3箇所測定し、ほぼ同様の結果を得た。実際の測定は、x-z断面における形状に対して法線方向から接触子を当て測定した。(1)真円度の平均値は15 μm であった。(2)加工面の形状精度を図13に示す。図の形状誤差は工具輪郭断面からの偏差を示したものである。次節の加工実験では、工具先端部のr=2.5mmの範囲を用いて加工するので、測定範囲をx軸方向 $\pm 3mm$ とし

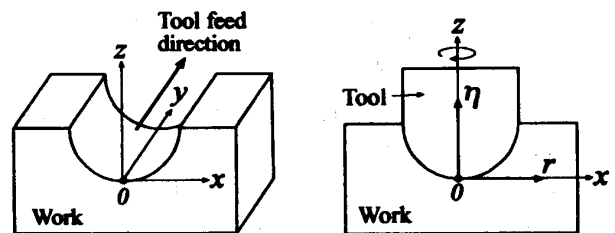


Fig.12 Fundamental cutting test

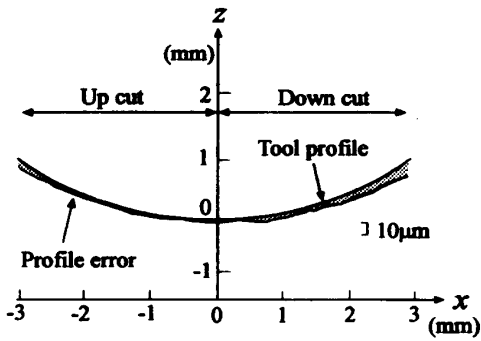


Fig.13 Profile error in x-z section

た。形状誤差は、アップカット側で約8μm、ダウンカット側で約10μmである。また、NC工作機械の精度検査表から主軸穴の振れは工具先端部付近で約8μmである。以上を考慮し、今回の切削条件で仕上げ加工した場合の、形状誤差の目標値を10μm以下とする。

5. 2 一辺勾配法と二辺勾配法を用いた加工実験

算出した工具経路の加工誤差を評価するために、工作物の加工形状は図14(A)の円弧形状と(B)の多角形状の二種類とした。(A)の円弧形状では二辺勾配法を用いて工具経路を算出し、工作物形状の理論値との偏差を評価した。(B)の多角形状では工作物座標点は尖点となり、3次元測定機を用いた測定で法線方向から接触子を当てるのは困難であり、式(10)で定義した加工誤差を直接測定できない。そこで得られた加工面の工作物勾配と工具運動勾配の理論値との差を評価した。

被削材にはケミカルウッドを用い、仕上げ加工は表1の切削条件のもと、同一箇所を往復切削で加工した。高速送りにすると仕上げ面粗さが悪くなり、算出した工具経路の誤差を検討できないので、1刃あたりの送り量を極力小さくし、0.006mm/刃（送り速度200mm/min）とした。ピックフィード方向の送り量は0.1mmである。二つの加工形状の切削結果について、それぞれを分けて以下に述べる。

(A) 円弧形状の工作物座標データは、図14に示すように半径Wr=50mmの円弧とし、その範囲はz軸を基準とし、y軸回りに±30°の範囲とし、0.1°刻みでフィード方向に600点のデータ点をとった。この場合、図

Table 1 Cutting conditions

Radius of tool	5 mm
Number of teeth	4 teeth
Tool revolution	8000 rpm
Feed rate	200 mm/min
Pick feed	0.1 mm
Cutting depth	0.2 mm

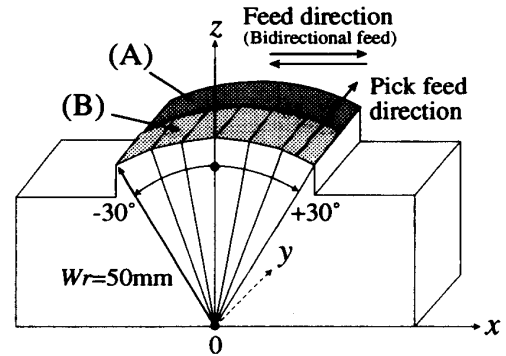


Fig.14 Designed work shape

15(A)に示すように、工作物座標点Waに対応する工具切れ刃輪郭上の切削点はTa($dr/d\eta=60^\circ, r=2.5\text{mm}$)となる。同様に、Wbに対しては工具先端のTbが、Wcに対してはTcが工具切削点となる。すなわち、工具先端のTbからTaまでの30°の範囲の工具切れ刃が、0.1°刻みで切削点を移動させながら切削を行うことになる。

円弧形状の評価を、(1)真円度、(2)形状精度の2種類について行った。(1)真円度測定はピックフィード方向の位置を3箇所変えて測定し、その平均値は10μmであった。(2)形状精度の測定結果を図16に示す。図の誤差は円弧断面の設計値からの偏差である。測定はx軸方向に±17mm (z軸から±20°)の範囲を0.1°刻みで400点を測定した。図の測定された形状は工具輪郭形状が転写された形となっており、x=0mm付近の突起状の形状は工具のエンドミル切れ刃中心部で切削されたものであり10μmほどあるが、全体の形状精度は8μm程度である。従って、仕上げ面形状精度の目標値10μmは達成されている。

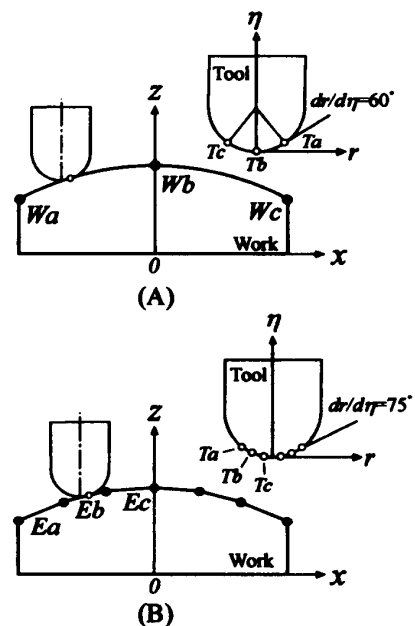


Fig.15 Relationship between work shape and cutting point on tool

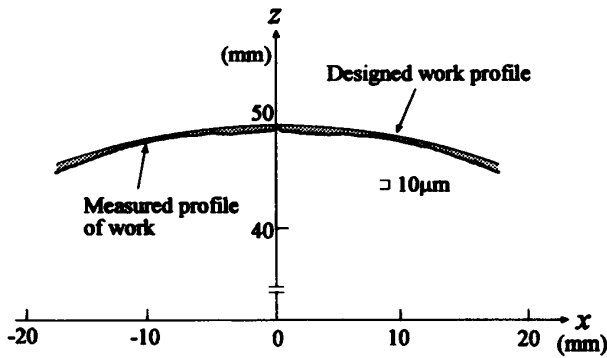


Fig.16 Profile error of work (A)

(B) 多角形状の工作物座標データは、半径50mm、円弧角を10°とした弦を、z軸からy軸回りに±30°の範囲に連続した6辺を持つ多角形（フィード方向に7点のデータ点）とした。この場合、図15(B)に示すように、工作物の辺Eaに対して工具切れ刃輪郭上の切削点は $Ta(dr/d\eta = 75^\circ, r = 1.3\text{mm})$ となる。同様に、辺Ebに対してTbが切削点となり、辺Ecに対してTcが切削点となる。すなわち、多角形の切削においては工具輪郭勾配が一定の点で切削されることになる。

多角形状の評価を、仕上げ面の勾配について行った。仕上げ面の勾配は図17に示す辺(a),(b),(c),(d)について測定した。一辺を1mmおきに8点測定した座標から勾配を算出した。測定結果を表2に示す。表の理論値は、一辺勾配法を用いて算出した工具運動勾配である。辺(a)の勾配は4.2節の計算例で示したが、理論値と実測値はほぼ一致している。また、辺(c)の誤差0.027°は $\Delta w_z = 8.682\text{mm}$ に対してz軸方向の誤差は4μmである。従って、勾配はかなり正確な値が得られた。

6. 結 言

本報告では、3軸制御加工を対象として、工作物形状が離散点座標値で与えられた場合の加工誤差の算出法を示した。さらに、実際に加工実験を行い、加工誤差を計測し検証した。得られた主な結果は以下の通り

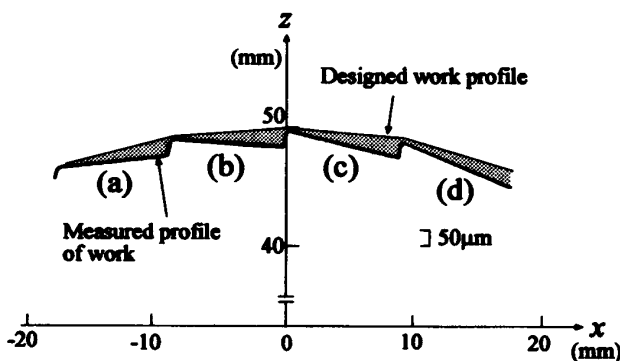


Fig.17 Profile error of work (B)

Table 2 Slope errors of work edge

Edge	Calculated	Measured	Errors
(a)	14.545°	14.546°	0.001°
(b)	4.545°	4.569°	0.024°
(c)	-5.454°	-5.427°	0.027°
(d)	-15.454°	-15.459°	-0.005°

である。

- (1)離散化された工作物勾配情報として一辺勾配法を用いた場合の加工誤差の算出法を示し、工作物格子間隔、工具半径、工作物曲率の違いによる加工誤差の大きさを計算例で示した。
- (2)二辺勾配法を用いた場合は、工作物座標点の前後二辺の勾配に対して、工具運動勾配もそれぞれ同時に完全に一致するので理論上は加工誤差は生じない。
- (3)加工実験の結果より、一辺勾配法を用いて切削した加工面の工作物勾配が、理論的に算出した工具運動勾配とほぼ一致することを確認した。
- (4)二辺勾配法を用いた場合の加工精度として、形状精度8μmが得られた。これ以上の精度向上の一つの方法として、4軸制御により工具輪郭上の切削点の範囲を限定して加工を行い、工具輪郭誤差の影響を小さくすれば、さらに精度を上げることができるものと思われる。

参考文献

- 1) 張 元建, 西田知照: 5軸制御工作機械による異形組合せ形状の加工, 長崎大学工学部研究報告, 27, 49,(1997),221.
- 2) 張 元建: 5軸制御工作機械による自由曲面加工アルゴリズムの開発に関する研究, 長崎大学海洋生産科学研究科学学位論文, 平成10年度.
- 3) 西田知照, 張 元建: 接線勾配を利用した自由曲面の5軸制御加工アルゴリズムの開発, 精密工学会誌, 64, 12, (1998),1801.
- 4) 西田知照, 小島龍広, 扇谷保彦: 数値制御工作機械による多軸制御加工に関する研究, 長崎大学工学部研究報告, 30, 55, (2000), 105.
- 5) 小島龍広, 西田知照, 扇谷保彦: 数値制御工作機械による3軸制御加工と離散化誤差, 長崎大学工学部研究報告, 31, 56, (2001), 35.
- 6) 近藤 司, 岸浪建史, 斉藤勝政: オフセット法を基にした形状加工処理, 精密工学会誌, 54, 5(1988) 971.