メッシュ曲面加工用 CAM システムに関する研究*

—加工精度, 法線誤差および格子間隔の関係—

趙 曉明** 葛 東方*** 堤 正臣*** 周 曉光†

Study on CAM System for Machining of Mesh Surface
— Relation of Machining Accuracy, Error of Normal Vector and Mesh Interval —

Xiaoming ZHAO, Dongfang GE, Masaomi TSUTSUMI and Xiaoguang ZHOU

Normal vector is approximately computed from the neighbouring four-point when sculptured surfaces can not be expressed with exact equations. Such surfaces are usually represented with mesh points distributed on the surfaces. The accuracy of the normal vector computed depends on the mesh intervals. While the machining accuracy of the sculptured surface is affected by NC data error introduced from normal vector error. In this study the authors investigate the interrelations among the machining accuracy, normal vector error and mesh intervals. A criterion is newly introduced to determine the normal vector error on the sculptured surfaces, and a method to determine the maximum mesh interval is proposed which satisfy the required machining accuracy without using extra data memories and calculation time.

Key words: CAM, meshed surface, machining accuracy, normal vector, mesh interval, tangent error

1. 結 言

近年, 同時5軸制御マシニングセンタが相次いで開発・応用されている。この背景には単純な形状の機械部品だけでなく, 自由曲面形状の部品を高効率に, かつ高精度に加工する必要性が増してきたことがあげられる。そのために, 自由曲面加工用のソフトウェアの開発が望まれている。

今まで, 3次元CADシステムで定義された基本プリミティブとユーザ定義によるプリミティブに基づいて, 干渉を考慮した5軸制御マシニングセンタ用ポストプロセッサが発表された¹⁾²⁾。また, オフセット面の表現方法には, CAM処理時間とメモリー容量の制限を考慮し高精度のNCデータを作成するための拡張Z-mapモデル法³⁾と粗密メッシュ法⁴⁾が提案された。

いくつかの関数から構成された曲面を局部的に修正して得られた曲面や, 3次元の測定によって作成した曲面はメッシュ状の切削点の集合で表すことができ, これらをメッシュ曲面と定義する。この場合, 切削点の法線は偏導関数で求められなくなり, その前後, 左右の4つの格子点を結ぶ2つの割線を接線としてベクトルの外積を利用して求めなければならないが, 求めた法線には誤差を生じる。この法線誤差による加工誤差の限界値を許容加工誤差 Δ と呼ぶと, 加工誤差を許容加工誤差 Δ 以下に抑えるためにメッシュの格子間隔をどの程度まで細かくすればよいかは解決されていないようである。

そこで本研究では, 二つの級数の積に関するAbel定理を利用して格子間隔と法線誤差との関係を求め, 法線誤差と加工誤差との関係を解明する。それをもとにして, 許容加工誤差を満足できる最小限のデータを生成する格子間隔の判断基準を提案す

ることを目的としている。さらに, 計算機シミュレーションによって, その判断基準の有効性を明らかにする。

2. 法線誤差と加工誤差との関係

2.1 法線誤差と加工誤差の概念

図1に示すように, 自由曲面上のある点Cにおいて, X, Y両方向の接線 τ_x, τ_y の外積で求めた誤差のない法線を $\vec{N}$ で表示する。X, Y両方向に割線を用いて求めた法線を $\vec{N}'$ とすると, $\vec{N}'$ には誤差がある。図中の $\vec{N}'$ と $\vec{N}$ となす角度 $\Delta\alpha$ を法線 $\vec{N}'$ の誤差と定義する。例えば, 図2に示すように凹面の最小曲率半径が4.95 mmである曲面に対して, 軸方向に m 個の間隔に分けるときの

Fig.1 Definition of error of normal vector ($\vec{N}$:Normal vector without error; $\vec{N}'$:Normal vector with error; τ_x :Tangent of X axis; τ_y :Tangent of Y axis.)

Fig.2 Example of curved surface

* 原稿受付 平成6年10月27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

† 北京郵電学院 (中国北京市海淀区学院路42号)

Fig. 3 Relationship between $\Delta\alpha_{\max}$ and number of mesh patches

(a) Planar surface (b) Convex surface (c) Concave surface

Fig. 4 Concept of overcut by error of normal vector
(R : Radius of tool; r : Radius of curvature; O : Center of tool; O_1 : Center of curvature.)

の最大法線誤差は図3に示す。格子間隔が小さいほど最大法線誤差が小さくなるのは図3から確認できる。

同時5軸マシニングセンタで自由曲面を切削するとき、ボールエンドミルの中心を切削点の法線上に切削点までの距離が工具ヘッド半径 R と等しいところに設定されているので、法線 $\vec{N}'$ の誤差 $\Delta\alpha$ による削り過ぎ Δ が生じる。この削り過ぎ Δ を加工誤差と定義する。

2.2 法線誤差と加工誤差との関係式

法線誤差による加工誤差を、平面 Δ_P 、凸面 Δ_V 及び凹面 Δ_C に分けて図4に示す。図中 O と O_1 はそれぞれ工具中心と切削点の曲率中心である。加工誤差 Δ_P 、 Δ_V 及び Δ_C は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta_P &= R(1 - \cos(\Delta\alpha)) \\ \Delta_V &= R + r - \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\pi - \Delta\alpha)} \\ \Delta_C &= R - r + \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\Delta\alpha)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、

R = 工具半径 (mm)

r = 切削点の曲率半径 (mm)

$\Delta\alpha$ = 法線誤差 (rad)

$\Delta_P, \Delta_V, \Delta_C$ = 平面、凸面及び凹面の加工誤差(mm)

工具半径 R と切削点の曲率半径 r とを一定にしたときの加工誤差 Δ と法線誤差 $\Delta\alpha$ との関係を図5に示す。図5から凹面の加工誤差 Δ_C が最も大きいことがわかる。また加工誤差 Δ_P 、 Δ_V 及び Δ_C は法線誤差 $\Delta\alpha$ の増大とともに大きくなることもわかる。

工具半径 R と法線誤差 $\Delta\alpha$ とを一定にしたときの加工誤差 Δ と曲率半径 r との関係を図6に示す。この図から凹面の加工誤差が最も大きいことがわかる。また、曲率半径が小さいほどより大きな加工誤差を持っていることもわかる。図中の直線 Δ_P は Δ_V と Δ_C の漸近線になる。すなわち、凸面の最大の加工誤差 $\Delta_{V\max}$ は Δ_P 、凹面の最小の加工誤差 $\Delta_{C\min}$ は Δ_P である。また、凹面の場合、法線誤差がゼロであっても、工具半径が曲率半径

Fig. 5 Relationship between overcut Δ and error of normal vector $\Delta\alpha$ Fig. 6 Relationship between overcut Δ and radius of curvature r

より大きいと加工誤差を生じることが式(1)の Δ_C からわかる。

以上から、凹面の法線誤差による加工誤差は平面と凸面との加工誤差より大きくなるので、凹面の場合、凹面の加工誤差を、凸面と平面の場合、平面の加工誤差をそれぞれ許容加工誤差内に抑えることを基準として、許容法線誤差 $\Delta\bar{\alpha}$ の値を決定する。

2.3 許容法線誤差 $\Delta\bar{\alpha}$

許容法線誤差 $\Delta\bar{\alpha}$ とは、加工誤差を許容加工誤差以下に抑えるために許せる最大の法線誤差である。

(1) 平面の場合、許容加工誤差を $\bar{\Delta}$ とすると、許容法線誤差 $\Delta\bar{\alpha}$ は次式で求められる。

$$\Delta\bar{\alpha} = \cos^{-1}(1 - \bar{\Delta}/R) \quad (2)$$

(2) 凸面の場合、2.2節からわかるように平面の加工誤差が許容加工誤差を満足すれば、凸面の加工誤差は許容加工誤差を満足できるので、凸面の許容法線誤差も式(2)で求められる。

(3) 凹面の場合、凹面の最小曲率半径を $r_{\min}$ とすると、選択する工具の半径は少なくとも凹面の最小曲率半径より小さい。工具半径 R を $Kr_{\min}$ ($K=0\sim 1$)と選択すると許容法線誤差 $\Delta\bar{\alpha}$ は

$$\Delta\bar{\alpha} = \cos^{-1} \left[\frac{(1-K)}{K} \left(\frac{\bar{\Delta}}{r_{\min}} \right) + \frac{1}{2K} \left(\frac{\bar{\Delta}}{r_{\min}} \right)^2 - 1 \right] \quad (3)$$

になる。 $K=0.8, 0.5, 0.2$ ときの許容法線誤差 $\Delta\bar{\alpha}$ と $\bar{\Delta}/r_{\min}$ (許容加工誤差と最小曲率半径との比)との関係を図7に示す。図7からより小さな半径の工具はより大きな許容法線誤差 $\Delta\bar{\alpha}$ を生じることがわかる。

以上、法線誤差と加工誤差との関係、許容法線誤差と許容加工誤差との関係を検討した。その結果から法線誤差が許容法線誤差より小さければ、法線誤差による加工誤差は必ず許容加工誤差より小さいことがわかった。次に、曲面上の格子間隔から法線誤差を求める方法について考察する。

3. 法線誤差 $\Delta\alpha$ の求め方

第1章で説明したように、法線は二つの割線を接線とみなし、

Fig.7 Relationship between $\Delta/r_{\min}$ and $\Delta\alpha$
(K :Rate of radius of tool and minimum radius of curvature)

Fig.8 Tangent error

その外積から求めたものである。まず、その割線を接線とみなす際に生じる誤差を考察する。

3.1 接線誤差

図8のようにX方向の二つの点を結ぶ割線と接線とのなす角を接線誤差と呼び、 $\Delta\alpha_t$ で表す。 Δx , $\Delta x/2$ の間隔の接線誤差をそれぞれ $\Delta\alpha_{t1}$, $\Delta\alpha_{t2}$ とすると、 $\Delta\alpha_{t1}$ と $\Delta\alpha_{t2}$ は次の式で求められる。

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_{t1} &= |\tan^{-1}(\tau_1) - \tan^{-1}(\tau)| \\ \Delta\alpha_{t2} &= |\tan^{-1}(\tau_2) - \tan^{-1}(\tau)|\end{aligned}\quad (4)$$

ただし、 τ は接線の傾き、 τ_1 は点AとBとを結ぶ割線の傾き、 τ_2 は点A'とB'とを結ぶ割線の傾きである。加工曲面の関数を $f(x, y)$ とすると、 τ_1 と τ_2 は切削点の座標値及び間隔を用いて次のように表せる。

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \frac{f(x+\Delta x, y) - f(x-\Delta x, y)}{2\Delta x} \\ \tau_2 &= \frac{f(x+\Delta x/2, y) - f(x-\Delta x/2, y)}{\Delta x}\end{aligned}\quad (5)$$

上式の $f(x+\Delta x, y)$, $f(x-\Delta x, y)$, $f(x+\Delta x/2, y)$ 及び $f(x-\Delta x/2, y)$ を点Cの近傍にテーラ級数で展開すれば、式(5)は

$$\begin{aligned}\tau_1 - \tau &= \left\{ \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \Delta x^2 + \frac{1}{5!} \frac{\partial^5 f}{\partial x^5} \Delta x^4 + \dots \right. \\ \tau_2 - \tau &= \left\{ \left(\frac{1}{4}\right)^1 \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \Delta x^2 + \left(\frac{1}{4}\right)^2 \frac{1}{5!} \frac{\partial^5 f}{\partial x^5} \Delta x^4 + \dots \right\}\end{aligned}\quad (6)$$

になる。式(6)の $\tau_1 - \tau$ の右辺は一つの収束級数で $\tau_1 - \tau$ に収束する。式(6)の $\tau_2 - \tau$ の右辺は二つの収束級数 S , S'

$$\begin{aligned}S &= \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \Delta x^2 + \frac{1}{5!} \frac{\partial^5 f}{\partial x^5} \Delta x^4 + \dots \\ S' &= \left\{ \left(\frac{1}{4}\right)^1 + \left(\frac{1}{4}\right)^2 + \dots \right\}\end{aligned}$$

からできるとみなし、一つは $\tau_1 - \tau$ に収束し、もう一つは $1/3$ に収束する。二つの収束級数に対して、Abel定理⁵⁾が適用できる。

Abel定理：二つの収束級数 $S = \sum u_n$ と $S' = \sum v_n$ を考えたとき、 w_n を次のように定義すると、

Fig.9 Calculation method of error of normal vector

$w_n = u_n v_1 + u_{n-1} v_2 + \dots + u_1 v_n$
 $\sum w_n$ が収束するとき、その値は SS' に等しい。

上の定理から

$$|\tau_2 - \tau| < \frac{1}{3} |\tau_1 - \tau|$$

式が得られる。したがって、次式が成立する。

$$|\tau_2 - \tau| < \frac{1}{2} |\tau_1 - \tau_2| \quad (7)$$

τ , τ_1 , τ_2 がX方向となす角度をそれぞれ α , α_1 , α_2 とすると、

$$\begin{aligned}\tau &= \tan(\alpha) \\ \tau_1 &= \tan(\alpha_1) \\ \tau_2 &= \tan(\alpha_2)\end{aligned}$$

α , α_1 及び α_2 の差は充分に小さいので、

$$\begin{aligned}|\tau_2 - \tau| &= |\tan(\alpha_2) - \tan(\alpha)| \approx |\alpha_2 - \alpha| \\ |\tau_1 - \tau_2| &= |\tan(\alpha_1) - \tan(\alpha_2)| \approx |\alpha_1 - \alpha_2|\end{aligned}\quad (8)$$

が成立する。ただし、

$$|\alpha_2 - \alpha| = \Delta\alpha_{t2}$$

$$|\alpha_1 - \alpha_2| = \Delta\alpha_{t1} - \Delta\alpha_{t2}$$

これを式(7)に代入すると、

$$\Delta\alpha_{t2} < \frac{1}{2} |\Delta\alpha_{t1} - \Delta\alpha_{t2}| \quad (9)$$

が得られる。すなわち点Cの近傍に割線 τ_2 の接線誤差は割線 τ_1 と割線 τ_2 とのなす角度の半分より小さいことがわかる。

3.2 法線誤差

曲面の場合、図9に示すようにX, Y両方向における接線誤差をそれぞれ $\Delta\alpha_x$, $\Delta\alpha_y$ とする。X方向の接線を $\partial f / \partial x$, Y方向の接線を $\partial f / \partial y$, 接線のベクトル誤差を $\Delta\bar{x}$, $\Delta\bar{y}$ とすると、法線 $\bar{N}$ と法線 $\bar{N}'$ は次のように表せる。

$$\begin{aligned}\bar{N} &= \frac{\partial f}{\partial x} \times \frac{\partial f}{\partial y} \\ \bar{N}' &= \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \Delta\bar{x} \right) \times \left(\frac{\partial f}{\partial y} + \Delta\bar{y} \right)\end{aligned}$$

法線 $\bar{N}$ と法線 $\bar{N}'$ との差 $\Delta\bar{N}$ は

$$\Delta\bar{N} = \frac{\partial f}{\partial x} \times \Delta\bar{y} + \Delta\bar{x} \times \frac{\partial f}{\partial y} + \Delta\bar{x} \times \Delta\bar{y}$$

で求められる。 $\Delta\bar{x}$, $\Delta\bar{y}$ が法線 $\bar{N}$ と平行であると、上式は

$$\Delta\bar{N} = \frac{\partial f}{\partial x} \times \Delta\bar{y} + \Delta\bar{x} \times \frac{\partial f}{\partial y} \quad (10)$$

と表せる。 $\Delta\bar{N}$ と $\bar{N}$ とのなす角度は 90° になり、法線誤差 $\Delta\alpha$ が最大になる。

$\Delta \bar{x}$ が $\partial f/\partial y$ に、 $\Delta \bar{y}$ が $\partial f/\partial x$ にそれぞれ垂直であるので、ベクトル $\partial f/\partial x \times \Delta \bar{y}$, $\Delta \bar{x} \times \partial f/\partial y$ の大きさは次式で求められる。

$$\left\| \frac{\partial f}{\partial x} \times \Delta \bar{y} \right\| = \left\| \frac{\partial f}{\partial x} \right\| \cdot \left\| \frac{\partial f}{\partial y} \right\| \cdot \tan(\Delta \alpha_{tx})$$

$$\left\| \Delta \bar{x} \times \frac{\partial f}{\partial y} \right\| = \left\| \frac{\partial f}{\partial x} \right\| \cdot \left\| \frac{\partial f}{\partial y} \right\| \cdot \tan(\Delta \alpha_{ty})$$

$\bar{N}$ と $\Delta \bar{N}$ の大きさ $\|\bar{N}\|$, $\|\Delta \bar{N}\|$ はそれぞれ次式で求められる。

$$\|\bar{N}\| = \left\| \frac{\partial f}{\partial x} \right\| \cdot \left\| \frac{\partial f}{\partial y} \right\|$$

$$\|\Delta \bar{N}\| = \left\| \frac{\partial f}{\partial x} \right\| \cdot \left\| \frac{\partial f}{\partial y} \right\| \cdot \sqrt{\tan^2(\Delta \alpha_{tx}) + \tan^2(\Delta \alpha_{ty})}$$

法線誤差 $\Delta \alpha$ は

$$\tan(\Delta \alpha) = \frac{\|\Delta \bar{N}\|}{\|\bar{N}\|} = \sqrt{\tan^2(\Delta \alpha_{tx}) + \tan^2(\Delta \alpha_{ty})}$$

である。 $\Delta \alpha, \Delta \alpha_{tx}, \Delta \alpha_{ty}$ の値は十分に小さいので、法線誤差 $\Delta \alpha$ は式(11)のようになる。

$$\Delta \alpha \approx \sqrt{\Delta \alpha_{tx}^2 + \Delta \alpha_{ty}^2} \quad (11)$$

3.3 最大法線誤差 $\Delta \alpha_{\max}$

曲面を、X方向に m 個の等間隔 Δx 、Y方向に n 個の等間隔 Δy に分割すると、 $(m+1)(n+1)$ の分割点になる。この $(m+1)(n+1)$ の分割点に対して式(11)を利用して求めた法線誤差の最大値を最大法線誤差 $\Delta \alpha_{\max}$ と呼ぶ。滑らかな曲面に対して、極大値と極小値とを取る点の近傍における曲面変化が大きいので、求めた法線の誤差は大きいはずである。そこで、極大値と極小値とを取る点の近傍だけの法線誤差の最大値を曲面の全域上の最大法線誤差とみなす。

3.4 格子間隔の判断基準

第2章の結果、式(9)及び式(11)を総合して、次のような格子間隔の判断基準が得られる。

間隔 Δx でメッシュ曲面を作成する場合、切削点の座標値で求めた法線誤差が許容法線誤差以内の最大値であれば、間隔 Δx は許容加工誤差を満足できる最大の格子間隔である。

4. アルゴリズム

本研究では、メッシュ曲面を計算機内で生成するために、代表的なパソコンCADであるAutoCADを利用した。このAutoCADで作成したDXFファイルを利用して種々の計算を行った。このDXFファイルは、パソコンCADにおいて標準的なデータ交換用ファイルフォーマット(Drawing eXchange Format)である。本研究では、計算時間を節約するために、予備処理として切削点の空間位置を表す座標値だけをDXFファイルから抽出した。抽出したデータ容量は元の容量の3割に過ぎない。以下に示すDXFファイルとは、このような処理を行ったファイルのことである。

法線誤差による加工誤差を許容加工誤差内に抑える格子間隔を求めるためのアルゴリズムは図10に示す。

Step 1 曲面をより短い間隔で分割してから、DXFファイルを生成する。このDXFファイルから曲面形状を識別する。

(1) 曲率半径と曲率中心 ある切削点に対して、X、Y両方向に各3点を用いて円弧の中心と半径とを求める。両半径とも無限大になる場合、この点は平面上にある。有限である場合、より小さな円弧半径を該当点の曲率半径と、円弧半径に対応する中心を曲率中心とする。曲率中心が法線ベクトルの正側にあると、この点は凹面上にあり、曲率中心が法線ベクトルの反対側にあると、この点は凸面上にある。

Fig.10 Algorithm on calculation of normal vector

Fig.11 Adjustment method of extreme points

(2) 極値の有無 凸面あるいは凹面上の切削点に対して、曲率半径が周囲の点の曲率半径より小さいと、この点は極値である。凸面にある場合、極大値になり、凹面にある場合、極小値になる。極小値の中で最小な曲率半径 $r_{\min}$ を求める。極値の位置と最小曲率半径を記録する。

Step 2 許容法線誤差 $\Delta \bar{\alpha}$ を求める。

(1) 平面と凸面の場合、許容法線誤差 $\Delta \bar{\alpha}$ を式(2)を利用して求める。

(2) 凹面の場合、工具半径 R と曲率半径 $r_{\min}$ によって K を求めから、許容法線誤差 $\Delta \bar{\alpha}$ を式(3)を利用して求める。許容法線誤差 $\Delta \bar{\alpha}$ が小さ過ぎると、さらに小さな工具を選択して、再び許容法線誤差 $\Delta \bar{\alpha}$ を求める。

Step 3 初期格子間隔 $\Delta x_0, \Delta y_0$ を R に近似して、X方向とY方向との分割数 M, N を正の整数にとる。 $\Delta x_0, \Delta y_0$ で曲面を分割して、データファイルDXF1をもとに、 $\Delta x_1 = \Delta x_0/2$, $\Delta y_1 = \Delta y_0/2$ で曲面を分割してデータファイルDXF2を生成する。

Step 4 極大値と極小値とをとる点の近傍だけで式(11)を用い最大法線誤差 $\Delta \alpha_{\max}$ を求めてから、最大法線誤差 $\Delta \alpha_{\max}$ と許容法線誤差 $\Delta \bar{\alpha}$ とを比較する。 $\Delta \alpha_{\max} > \Delta \bar{\alpha}$ の場合、Step 5に進む。 $\Delta \alpha_{\max} \leq \Delta \bar{\alpha}$ の場合、Step 6に進む。

Step 5 ファイルDXF2をDXF1とみなし、ファイルDXF2に応じた格子点を2倍細かくして新しいファイルDXF2を生成する。次

Fig.12 Example of a mesh surface

Table 1 Calculation condition

Area of curved surface	$X \times Y$	280 × 280 mm ²
Minimum radius of curvature	$r_{\min}$	20 mm
Radius of tool	R	8 mm
Permissible cutting error	$\bar{\Delta}$	0.1 μm

の方法に従って極大値(または極小値)の位置及び曲率半径を調整する。その調整方法を図11に示す。

細かくした後の極大(または極小)点 C_0 の近傍の点を $a_1 \cdots a_8$ として、この9個の点の曲率半径を求め、最小曲率半径を取った点を新しい極大値(または極小値)とする。

凹面の最小曲率半径 $r_{\min}$ と工具半径 R とを比較する。 $R \geq r_{\min}$ の場合、最小曲率半径 $r_{\min}$ より小さな工具を選択する。再び許容法線誤差 $\Delta\bar{\alpha}$ を求めてからStep 4に進む。 $R < r_{\min}$ の場合、Step 4に進む。

Step 6 すべての切削点の法線を求める。

5. 計算機シミュレーションの結果

上述のアルゴリズムに基づいて、曲面の関数と偏導関数とを使わないメッシュ曲面の格子間隔と法線を求めるプログラムを開発した。このプログラムの有用性を明らかにするため、曲面の関数と偏導関数がわかる曲面を用いて、格子間隔、法線誤差及び加工誤差などの計算を行った。

表1に示す条件下で図12に示した曲面(関数のわかる)の格子間隔を求めた。この曲面には凹面が含まれているので、許容法線誤差 $\Delta\bar{\alpha}$ は式(3)から 0.229° となる。初期格子間隔 $\Delta x_0 = \Delta y_0 = 8$ mmから8 mmと4 mm, 4 mmと2 mm, 2 mmと1 mmとの格子間隔で式(11)を利用して法線誤差の計算を繰り返し、格子間隔が1 mmでの最大法線誤差 $\Delta\alpha_{\max}$ は許容法線誤差 0.229° より小さくなり、要求を満足する。この方法で求めた法線誤差及び法線誤差による加工誤差を計算誤差と呼び、○印で表す。偏導関数で求めた法線 $\vec{N}$ と4 mm, 2 mm, 1 mmの格子間隔で求めた法線 $\vec{N}'$ との法線誤差及び法線誤差による加工誤差を実際誤差と呼び、▽印で表す。法線誤差と加工誤差との計算誤差と実際誤差をそれぞれ図13(a), (b)に示す。

図13から法線誤差と加工誤差とともに実際誤差は計算誤差より小さいのがわかる。すなわち、本研究で提案したアルゴリズムをもとに格子間隔を求めて、この間隔での格子点の割線の外積を利用して求めた法線の誤差が許容法線誤差を満足すれば、実際の法線誤差は必ず許容法線誤差を満足できる。これによって、実際の法線誤差による加工誤差も許容加工誤差を満足することになる。

許容加工誤差を1 μmと大きくすると、初期の格子間隔8 mmから2回目の2 mmの格子間隔で許容加工誤差は満足されること

(a) Comparison of error of normal vector

(b) Comparison of error of overcut

Fig.13 Comparison of error

も図13(b)からわかる。

上述した図12と図13は本アルゴリズムに基づいたプログラムの有用性を確認した一例である。種々の曲面(関数がわかる)の計算結果から実際誤差は計算誤差より小さくなる。

6. ま と め

本研究では、曲面の関数を使わずに法線を求めるとき、格子間隔と法線誤差との関係、法線誤差と加工誤差との関係を検討し、加工誤差要求を満足する曲面全域で格子間隔と法線を求めるプログラムを開発した。シミュレーションの結果から以下の結論が得られた。

- (1) 提案した判断基準により求めた格子間隔でメッシュ曲面を分割すると、法線誤差による加工誤差は許容加工誤差以内に抑えられる。
- (2) 提案した式を用いた切削点の法線誤差(計算誤差)は法線 $\vec{N}$ と $\vec{N}'$ との誤差(実際誤差)よりも大きいので、格子間隔を細かくして法線誤差の計算誤差を許容法線誤差に満足させれば、法線誤差の実際誤差は必ず許容法線誤差を満足できる。
- (3) 法線誤差と同様に加工誤差の計算誤差は実際誤差より大きい。すなわち、格子間隔を細かくして法線誤差による加工誤差の計算誤差を許容加工誤差に満足させれば、加工誤差の実際誤差も必ず許容加工誤差を満足できる。

参 考 文 献

- 1) 竹内芳美, 清水弘幸, 出村 健, 渡辺隆弘, 伊藤哲也: ソリッドモデルに基づく5軸制御加工, 精密工学会誌, 56, 11 (1990) 2063.
- 2) 竹内芳美, 渡辺隆弘: 5軸制御マシニングセンタ用ポストプロセサの研究, 精密工学会誌, 58, 9 (1992) 1586.
- 3) 郝 明暉, 水垣善夫, 坂本正史: 拡張Z-mapモデルによるCAMの開発, 精密工学会誌, 60, 2 (1994) 275.
- 4) 築島隆壽, 長沼 学, 白井健二: 粗密メッシュを用いたCAMシステムの高精度化・高速化方法. 1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1993) 459.
- 5) 日本数学会編: 岩波数学辞典, 第3版, 岩波書店, (1985) 212.