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*

西 田 知 照** 張 元 建***

Development of Five-axis Control Processing Algorithm for Free-formed Surfaces Using Tangent Slopes
Noriteru NISHIDA and Yuanjian ZHANG

This report deals with the way to decide tool posture, the way to analytically calculate tool path and the way to check the interference between tool system and work one. In the tool path calculation, basic equations are derived using the principle that the tangent slope at a cut point on a work and the one at a cutting point on a tool edge are identical. A tool posture decision procedure using the tangent slope at each cut point on a work is proposed for any shape of tool edge. A checking method for collision interference between a tool system (tool, tool holder, spindle head etc.) and a work system (work and its fixing equipment etc.) is also shown. The reliability and calculation efficiency of this algorithm is verified by test cutting of an impeller.

Key words: NC machine tool, free-formed surface machining, analytical calculation of tool path, tool posture, tangent slope, tangent plane, collision interference

1. 緒 言

自由曲面の5軸制御加工においては、工具としてボール形状の切れ刃を持った工具が使われることが多い。ボール形状切れ刃の工具であれば、工具経路の算出と工具姿勢の決定を分離して扱えるため、工具経路の決定が容易になる利点がある。また、工具姿勢調整の自由度も大きい。しかし、高能率加工や高硬度被削材の切削を行う場合には、ボール形状以外の工具を使用する必要がある。例えば、高硬度材の切削に丸コマチップなどのスローアウエイタイプのチップを取り付けた工具を使用するのがその例である。このような場合に対応するには、工具の切れ刃形状がいかなる形状であっても、工具姿勢や工具経路が算出できるアルゴリズムの開発を必要とする。

従来のこの分野の研究主題は工具姿勢の決定、工具運動経路の決定、干渉チェックである。工具経路の算出に関しては、上に述べたようにボールエンドミルを対象としたものが多い^{1)~4)}。工具形状がボールでない場合については、工具の姿勢制御領域を特定の平面内に限定して工具経路の算出を可能としたものがある^{5)~6)}。この方法では、工具姿勢が工作物形状に応じて連続的に変化するので効率的なNCデータの算出が可能である。しかし、工具の姿勢制御領域を一つの面に制限しているため、工具干渉を避け得ない可能性もある。この点から、工具姿勢の制御平面を2平面へと拡張することが望ましい。工具姿勢の決定法に関しては、まず暫定的に工具姿勢を決め、干渉を回避するように工具姿勢を修正するもの^{1)~4)}と、工具上の切削点を先に定めることによって工具姿勢が定まるようにしたもの^{5)~6)}とがある。干渉チェック法に関しては、チェック領域の絞り込みを行うことによって効率よい干渉回避を可能としたもの³⁾、工具姿勢の変更可能領域の絞り込みを可能としたもの⁴⁾、などがある。

以上の従来の研究に対して、本研究は、工具経路の算出を解析的に行うアルゴリズムの開発を主題としながら、(1)任意の工具形状を対象とし、(2)工具姿勢を工作物形状に関する直

交2平面での勾配情報を使って定める、(3)工具姿勢が定まると、工具経路は解析的に算出される、(4)工具系(工具、工具ホルダ、主軸ヘッド)と工作物系(工作物、固定具類)間での干渉チェックを簡単に行う方法を提案する、などを特徴としている。

本研究では、工作物上の加工点が切削されるとき、工具切れ刃上の切削点の接線勾配と工作物上の加工点における接線勾配が等しくなる(付録1参照)という基本性質を利用している。この性質を用いて、任意の切れ刃形状を持つ工具の運動経路の算出法が導かれている。また、工具姿勢を直交する2平面で観察し、それぞれの平面内で工具軸の傾きと工作物加工点の接線勾配とを関連付けることにより、干渉が生じない工具姿勢を定めている。

以上のような解析にあわせて、これらの処理方法の有効性、実用性およびNCデータ生成の高速性を加工実験によって検証した。

2. 座標系の定義と工作物に関する 接線勾配の算出

5軸制御加工システムの工作物座標系 x - y - z と工具座標系 ξ - ζ - η の関係を図1に示す。工作物座標系 x - y - z は固定座標系とする。工具座標系 ξ - ζ - η は工具の運動と共に動く運動座標系である。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) で表し、工具軸の傾き(工具姿勢)を α, β で表している。

与えられた工作物形状を式(1)で表すとき、工作物形状上の任意の一点 $W(x_w, y_w, z_w)$ における x, y 軸方向についての接線の勾配は式(2)で算出される。

$$\begin{aligned} x_w &= f(u, v) \\ y_w &= g(u, v) \\ z_w &= h(u, v) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T_{wx} &= \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_w = \frac{g'_u h'_v - g'_v h'_u}{f'_v g'_u - f'_u g'_v} \\ T_{wy} &= \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_w = \frac{f'_v h'_u - f'_u h'_v}{f'_v g'_u - f'_u g'_v} \end{aligned} \quad (2)$$

* 原稿受付 平成10年3月2日

** 正 会 員 長崎大学工学部(長崎市文教町1-14)

*** 学生会員 長崎大学大学院

Fig. 1 Relationship between work coordinate x - y - z and tool coordinate ξ - ζ - η

式(2)で表される接線勾配 T_{wx} , T_{wy} は図2に示すように、工作物上の点 $W(x_w, y_w, z_w)$ 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 $W(x_w, y_w, z_w)$ 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。

3. 工具姿勢の決定

工具姿勢は図1に示すように、 z 軸周りの回転角度 α および z 軸を基準とする傾き角 β で表す。実際の加工時には、工作物上の各点ごとに α および β の値を定める必要がある。しかし、例えば図9に示すインペラーのような複雑な形状の加工物の場合、すべての加工点に関する工具姿勢情報を事前に与えるのは煩雑である。そこで、加工物に関する形状および勾配情報などを利用して α , β の自動算出を行うようにする。決定の手順としてはまず α を決定し、次に β を決定する。

3.1 工具姿勢角 α の決定

工具姿勢角 α は図1の α 平面すなわち x - y 平面内の角度である。一般的に、 α の値はかなりの自由度を有する。工具姿勢角 α の決定に当たって考慮すべき点は、工具を必ず工作物の非実体側に置くこと、さらに β 平面での工作物形状ができる限り単純な形状になり、 β 平面における工具姿勢角 β を工具干渉なく定めることができるように α の値を定めることである。 α の値は α 平面における工作物形状を利用して決定する。ここでは加

Fig. 2 Definition of a tangent plane by two tangent slopes T_{wx} and T_{wy}

工物が図9に示すインペラーであることを考慮し、 α 平面における工作物形状として工作物の x - y 平面への回転投影形状を採用することにした。

図9に示すインペラーの、ある x - z 断面での形状は図3のようになり、この工作物表面上の各点を y 軸周りに回転させ、 x - y 平面上へ投影する。回転投影した結果として図4が得られる。図4において、格子点は工作物上の加工点に対応した点である。また、格子点の並びを記号 I , J で表している。任意の格子点 $W(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ に対応する工作物上の加工点での工具姿勢角 α を次式で定める。

$$\alpha_{ij} = \tan^{-1} \frac{y_{i,j+1} - y_{ij}}{R_{i,j+1} - R_{ij}} \quad (3)$$

$$R_{ij} = \sqrt{x_{ij}^2 + z_{ij}^2}$$

式(3)は点 w_{ij} と点 $w_{i,j+1}$ 間の勾配(J 方向)を用いて α を求める形になっている。従って、工作物の形状変化に応じて徐々に工具姿勢角 α が変化することになる。

3.2 工具姿勢角 β の決定

工作物上の加工点に対して工具軸が占めることのできる空間はこの加工点における接線勾配 T_{wx} , T_{wy} (図2参照)で定まる接平面の非実体側に制限される。従って、この接平面の傾きに基づいて工具姿勢角 β を定めると、工作物形状の変化に応じて自動的に工具姿勢角 β を得ることができる。

工具姿勢角 β の決定に当たっては、工作物上の加工点における接平面が β 平面 (図1参照)に成す傾き情報を利用する。工作物上の点 W_{ij} (図4における格子点 w_{ij} に対応する工作物上の点)の β 平面上における断面形状が図5であるとする。この時、工作物上の加工点 W_{ij} における接平面と β 平面の交線が図5に示

Fig. 3 Rotation of points around y axis to get work shape on a α plane

Fig. 4 Work shape on a α plane

す接線 $L\alpha$ となる。工作物座標系で表した接線 $L\alpha$ の勾配 $T_{w\alpha}$ (α によって定められた β 平面内での勾配) は式(2)で得られた T_{wx} , T_{wy} と工具姿勢角 α を用いて次式で表される。

$$T_{w\alpha} = T_{wx} \sin \alpha + T_{wy} \cos \alpha \quad (4)$$

図5において、工具軸 η の傾きを接線 $L\alpha$ の傾きに一致させる場合、つまり工具の外周円筒部切れ刃で切削する場合、 β 平面における工具姿勢角 β_L は次式で求められる。

$$\beta_L = \cot^{-1} T_{w\alpha} \quad (5)$$

実際には、工具姿勢角 β は工具干渉を回避するように決めなければならない。つまり図5において、点 W_{ij} の右側あるいは左側に存在する工作物上の各点に関し干渉が生じないように β を決定する。例えば、点 W_{ij} の右側に存在する各点を干渉チェックの対象として工具姿勢角 β を決定する場合には、加工点 W_{ij} の j が増加する方向に存在する点 W_{ik} ($k=j+1, j+2, \dots$) との間を結ぶ線分の傾き角 β_k を次式で算出する。

$$\beta_k = \cot^{-1} \frac{\Delta z_{jk}}{\sqrt{\Delta x_{jk}^2 + \Delta y_{jk}^2}} \quad (6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Delta x_{jk} &= x_{ik} - x_{ij} \\ \Delta y_{jk} &= y_{ik} - y_{ij} \\ \Delta z_{jk} &= z_{ik} - z_{ij} \end{aligned} \quad (7)$$

β_k の最小値を $\beta_{k \min}$ とすると、 $\beta_{k \min}$ と式(5)の β_L との大小関係によって工具姿勢角 β の決定は以下のように分けられる。

1) $\beta_{k \min} < \beta_L$ の場合

工具姿勢角 β を次式で定める。

$$\beta = \beta_{k \min} - c \quad (8)$$

ここで、 c は工具切れ刃上の切削点を指定するためや、荒削り時の削り残し量の分だけ点 W_{ik} ($k=j+1, j+2, \dots$) の付近に肉が残っていることを考慮するための余裕量である。

2) $\beta_{k \min} > \beta_L$ の場合

加工点 W_{ij} について j が増加する方向には障害物は存在しないので、工具姿勢角 β を次式で定める。

$$\beta = \beta_L - c \quad (9)$$

以上のような手法によって、 α の場合と同様に β もその値が

Fig. 5 Work shape on a β_i plane

急激に変化することではなく、工作物の形状変化に応じて徐々に工具姿勢角 β が変化することになる。

4. 工具経路の算出

工作物上の各加工点における工具姿勢角 α , β が定まれば、各加工点を削る際の工具原点の位置も定まる。この工具原点の位置を具体的に求めるに当たっては、加工点における接平面と工具切れ刃上の切削点における接平面が一致するという性質を利用する。ここで、工作物上の加工点 $W(x_w, y_w, z_w)$ における接平面の x, y 軸方向の勾配 T_{wx} , T_{wy} は式(2)で求められる。従って、残る工具切れ刃上の任意の点における接平面の x, y 軸方向勾配が算出されれば、この二者によって工具経路が決定される。

4.1 工具切れ刃輪郭の表現

図6に示すように、工具座標系での工具切れ刃輪郭を工具軸断面形状と工具軸周りの角度で表現し、式(10)の形で定義する。

$$\begin{aligned} r &= r(\eta) \\ \theta &= \theta \end{aligned} \quad (r \geq 0) \quad (10)$$

図1に示すように、工具の原点が工作物座標系で点 (o_x, o_y, o_z) にあり工具が姿勢角 α , β を持つ場合、式(10)で表される工具切れ刃輪郭上の一点 (r, η, θ) を工作物座標系 $x-y-z$ で表すと次式となる(付録2参照)。

$$\begin{aligned} x &= o_x + \eta \cos \alpha \sin \beta + r (\cos \alpha \cos \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta) \\ y &= o_y + \eta \sin \alpha \sin \beta + r (\sin \alpha \cos \beta \cos \theta + \cos \alpha \sin \theta) \\ z &= o_z + \eta \cos \beta - r \sin \beta \cos \theta \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)は r, η, θ をパラメータとする空間曲面である。

4.2 工具切れ刃上の切削点

式(11)で表される工具切れ刃輪郭上の任意の点 $P(r, \eta, \theta)$ における接平面の $x-z$ 断面、および $y-z$ 断面における勾配 $T_{\alpha x}$, $T_{\alpha y}$ は式(11)についての x および y 方向の偏導関数 $\partial z / \partial x$, $\partial z / \partial y$ から求められる。誘導は複雑であるが整理すると次式で表される。

$$T_{\alpha x} = \frac{\cos \alpha \cos \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta - \cos \alpha \sin \beta \frac{dr}{d\eta}}{\sin \beta \cos \theta + \cos \beta \frac{dr}{d\eta}} \quad (12)$$

$$T_{\alpha y} = \frac{\sin \alpha \cos \beta \cos \theta + \cos \alpha \sin \theta - \sin \alpha \sin \beta \frac{dr}{d\eta}}{\sin \beta \cos \theta + \cos \beta \frac{dr}{d\eta}}$$

すでに述べたように、工具切れ刃上の切削点を求めるに当

Fig. 6 Definition of tool shape

たつては、工作物加工点における接平面（図2参照）と工具切れ刃上の切削点における接平面が一致するという性質を利用する。すなわち、二つの接平面の x - z 断面および y - z 断面における勾配がそれぞれ一致し、 $T_{cx} = T_{wx}$, $T_{cy} = T_{wy}$ となる。そこで、式(12)の左辺の T_{cx} , T_{cy} に式(2)の T_{wx} , T_{wy} を代入し、 θ , $dr/d\eta$ について解くと、工具切れ刃上の切削点 $P(r, \eta, \theta)$ を決定する条件として、式(13), (14)が得られる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{T_{wa} + \pi/2}{T_{wa} \cos \beta + \sin \beta} \right) + n\pi \quad (13)$$

$$\frac{dr}{d\eta} = \frac{\cos \beta - T_{wa} \sin \beta}{\sqrt{(\sin \beta + T_{wa} \cos \beta)^2 + T_{wa}^2 + \pi/2^2}} \quad (14)$$

ここで、

$$T_{wa} + \pi/2 = T_{wy} \cos \alpha - T_{wx} \sin \alpha \quad (15)$$

式(14)と式(10)を連立させて解くと、工具切れ刃上の切削点 $P(r, \eta, \theta)$ の r と η の値が得られる。

4.3 工具原点の位置

前節で求められた工具切れ刃上の切削点 $P(r, \eta, \theta)$ を工作物上の加工点 $W(x_w, y_w, z_w)$ に一致させることによって、工具位置が得られる。すなわち、工具切れ刃上の点 $P(r, \eta, \theta)$ を工作物座標系 x - y - z で表した式(11)に工作物上の加工点 W の座標値 (x_w, y_w, z_w) と前節で得られた工具切れ刃上の切削点 P の座標値 (r, η, θ) を代入すると、工具原点の位置 (o_x, o_y, o_z) が次式のように得られ、これが工具経路上の点となる。

$$o_x = x_w - \eta \cos \alpha \sin \beta - r (\cos \alpha \cos \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)$$

$$o_y = y_w - \eta \sin \alpha \sin \beta - r (\sin \alpha \cos \beta \cos \theta + \cos \alpha \sin \theta)$$

$$o_z = z_w - \eta \cos \beta + r \sin \beta \cos \theta$$

(16)

5. 干渉のチェック

第3章に示した工具姿勢の決定法では、工具と工作物間に干渉が生じないように工具姿勢を決定した。ただし、これはあくまで工具切れ刃部と工作物加工部との間の干渉を回避したにすぎず、工具ホルダや主軸ヘッド部と工作物や固定具・ジグ類間に生じる干渉のチェックが残されている。

図7において、工具がある瞬間に切削している加工点を W 、この瞬間の工具原点の位置を点 O_c 、干渉チェックの対象点を E とする。これらの点の工作物座標系での座標をそれぞれ

Fig. 7 Check of interference between work and tool systems

(x_w, y_w, z_w) , (o_x, o_y, o_z) , (x_e, y_e, z_e) とする。ここで、点 E は固定具・ジグ類を含めた工作物系表面上の任意の一点である。また、点 $E(x_e, y_e, z_e)$ から工具系（工具、工具ホルダ、主軸ヘッド部を含む）軸 η に下ろした垂線と η 軸の交点を点 F とする。

点 E の座標値 (x_e, y_e, z_e) を式(11)の左辺に代入して次式を得る。

$$x_e = o_x + \eta \cos \alpha \sin \beta + r (\cos \alpha \cos \beta \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta)$$

$$y_e = o_y + \eta \sin \alpha \sin \beta + r (\sin \alpha \cos \beta \cos \theta + \cos \alpha \sin \theta) \quad (17)$$

$$z_e = o_z + \eta \cos \beta - r \sin \beta \cos \theta$$

式(17)を r, η, θ について解くと、点 E の工具座標系での位置 (r_e, η_e, θ_e) が得られる。そこで、 $\eta_e > 0$ である点 F における工具系の半径 r_{η_e} と r_e を比較し、次式を満足すれば干渉は生じていないと判定する。

$$r_e > r_{\eta_e} + \Delta \quad (18)$$

ここで、 Δ は工具系と工作物系間に与えるべきすきま量である。

6. 加工実験

以上の処理方法に基づき、図9に示すインペラーの加工実験を行った。図8は加工中の様子を示す。加工用NC工作機械は三菱重工製の5軸制御横形マシニングセンタM-H50Dである。使用工具は $\phi 12$ のラジスエンドミルであり、コーナ半径は $R3$ である。実際の切削はコーナ部で行った。被削材としてはケミカルウッドを使用した。

Fig. 8 An impeller in the process of machining

Fig. 9 A finished impeller

NCデータの作成手順を以下に示す。

(1) 工作物上の格子点は図4に対応するように設定し、 I 方向をフィード方向、 J 方向をピックフィード方向とする。工作物の一つの羽根溝の図面データ100点に対し、スプライン補間を施し、10000点の格子点データを生成する（フィード方向50点、ピックフィード方向200点）。

以下、上述の10000点の格子点のすべてについて、

(2) 式(2)の差分形式表現である式(19)を用いて、 x 、 y 軸方向の接線の勾配 T_{wx} 、 T_{wy} を求める。

$$\begin{aligned} T_{wx} &= \frac{\Delta y_i \Delta z_j - \Delta y_j \Delta z_i}{\Delta x_j \Delta y_i - \Delta x_i \Delta y_j} \\ T_{wy} &= \frac{\Delta x_j \Delta z_i - \Delta x_i \Delta z_j}{\Delta x_j \Delta y_i - \Delta x_i \Delta y_j} \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= x_{i+1,j} - x_{ij}, & \Delta x_j &= x_{i,j+1} - x_{ij} \\ \Delta y_i &= y_{i+1,j} - y_{ij}, & \Delta y_j &= y_{i,j+1} - y_{ij} \\ \Delta z_i &= z_{i+1,j} - z_{ij}, & \Delta z_j &= z_{i,j+1} - z_{ij} \end{aligned} \quad (20)$$

(3) 式(3)から工具姿勢角 α を算出し、式(8)あるいは式(9)を用いて工具姿勢角 β を算出する。

(4) 式(10)、(13)、(14)を用いて、工具切れ刃上の切削点座標 (r, η, θ) を求め、これらの値を式(16)に代入し、工具原点の位置すなわち工具経路データ (o_x, o_y, o_z) を得る。

(5) 式(21)、式(22)を利用して工具姿勢および工具経路データをNCデータ $(N_x, N_y, N_z, N_\alpha, N_\beta)$ に変換し、マシニングセンタを動かすためのプログラムを作成する。

$$\begin{aligned} N_\alpha &= \alpha \\ N_\beta &= \beta \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{bmatrix} \quad (22)$$

以上の全行程の計算に要した時間は、パーソナルコンピュータPower Macintosh 7200/120で約20秒間であった。

また、一つの羽根溝の約1000点（羽根面400点×2、溝底部200点）について、第5章に示した方法で干渉チェックを行い、干渉がないことを確認した。干渉チェックに要した時間は約30秒間であった。

荒削りにおいては、フィード方向に25点、ピックフィード方向に10点の格子点を取り、仕上げ削りと同様の計算手順でNCデータを作成した。ただし、仕上げ代を残すために工具経路算出時の工具寸法は $\phi 16-R3$ とし、実際の荒削り切削には $\phi 12-R3$ を用いた。また、羽根溝の底までを3回に分けた切込みで加工した。この処理はNCデータの N_z 値に対し、各回ごとに+35 mm、+20 mm、+3 mmの補正を施すことで行った。

荒削りから仕上げ削りまでに要した時間は、工具送り速度300 mm/minで約5時間であった。

7. 結 言

5軸制御を必要とする自由曲面の加工を対象として、任意の切れ刃輪郭形状を持つエンドミルを用いる場合について、工具姿勢や工具経路を解析的に算出する手法を提案した。そ

の結果を以下に示す。

- (1) 解析的手法を基礎として、5軸制御加工用のNCデータを短時間で生成するための手順と主要な算出式を示した。
- (2) 工具姿勢角を α 平面と β 平面内に分けて検討し、工具干渉を考慮しながら工作物の形状変化に応じて工具姿勢を変化させる方法を示した。
- (3) 工具経路の算出に当たっては、工作物上加工点における接平面と工具切れ刃上切削点における接平面が一致するという性質を利用し定式化を行った。
- (4) 工作物と固定具類を含めた工作物系と、工具と工具ホルダや主軸ヘッド部を含めた工具系間の干渉チェックの方法を提案した。
- (5) インペラーの加工実験によって、工具姿勢の決定方法の妥当性および工具経路算出法の実用性と高速性を検証した。

最後に、加工実験に当たっては、三菱重工業（株）長崎造船所第一工作部のご協力を頂いた。ここに、厚くお礼を申し上げます。

付録1 接線勾配法

2次元で、工具上の一点Cが工具運動（移動）を伴いながら工作物上の一点Wを削り出す瞬間を考える。このとき、点Cと点Wが一致すると共に、点C、点Wにおける接線の勾配 T_c 、 T_w が一致する。すなわち、 $T_c = T_w$ となる。3次元では、接線に代わり、2つの接平面の勾配が一致する。すなわち、接平面の x および y 軸方向の勾配が一致する。従って、 $T_{cx} = T_{wx}$ 、 $T_{cy} = T_{wy}$ が成立する。

付録2 式(11)の誘導過程の説明

工具座標系で表した工具切れ刃上の一点 (r, η, θ) に対し、工具座標系（図1）の y 軸まわりに β の回転を与え、 z 軸まわりに α の回転を与え、さらに、工具原点を工具座標系の点 (o_x, o_y, o_z) へ移動させ、その結果を工作物座標系で表すと次式となる。これを整理して示すと式(11)となる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & o_x \\ 0 & 1 & 0 & o_y \\ 0 & 0 & 1 & o_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \cos\theta \\ r \sin\theta \\ \eta \\ 1 \end{bmatrix}$$

参 考 文 献

- 1) 竹内芳美, 長坂 学, 森重功一: ボールエンドミルの先端切れ刃・側面切れ刃を併用した5軸制御加工, 精密工学会誌, 61, 4 (1995) 561.
- 2) 森重功一, 加瀬 究, 竹内芳美: C-Spaceを用いた5軸制御加工のための工具経路生成法, 精密工学会誌, 62, 12 (1996) 1783.
- 3) 趙 晓明, 葛 東方, 堤 正臣: 同時5軸制御マシニングセンタ用CAMシステムに関する研究, 精密工学会誌, 61, 12 (1995) 1745.
- 4) 森重功一, 加瀬 究, 竹内芳美: 2次元空間を用いた5軸制御加工における工具干渉回避法, 精密工学会誌, 62, 1 (1996) 80.
- 5) 中軽米直樹, 森重功一, 竹内芳美: 円すい体切れ刃工具を用いた5軸制御加工, 精密工学会誌, 63, 3 (1997) 415.
- 6) 小西和正, 福田好郎, 岩田一明: 5軸制御加工における工具干渉検出と回避法に関する研究, 精密工学会誌, 63, 9 (1997) 1258.