

# 5軸マシニングセンタのための新しいNCコントローラの提案\*

張 勤\*\* 関 啓明\*\* 疋津正利\*\* 神谷好承\*\* 野村久直\*\*\*

Development of New NC Controller for 5-Axis Control Machining Center

Qin ZHANG, Hiroaki SEKI, Masatoshi HIKIZU, Yoshitsugu KAMIYA and Hisanao NOMURA

5-axis control machining centers are widely used for machining complicated shape pieces of work. Because the multi-axis machines such as 5-axis control machining center have not perpendicular coordinates of their driving axes, it is difficult to generate the tool path accurately according to interpolation of line and curve by the conventional NC controller. In this study, the new NC control method for 5-axis control machining center is proposed. In this method, that uses its jacobian matrix, V-F transformer and direct kinematics of 5-axis control machine, pulse series for driving 5-axis control machining center can be generated on real time with software for realizing a desired path of tool. The effectiveness of the proposed method is discussed by simulation as the case of machining a circle by using the new NC controller for 5-axis control machining center.

**Key words:** 5-axis control machining center, NC controller, jacobian matrix, pulse series

## 1. はじめに

曲面で構成される複雑な金型の加工には一般に5軸以上の制御軸数を持つマシニングセンタが必要とされる。その主な理由は、加工面のもつ法線方向にツール姿勢を保持することに代表されるように、加工中にツールの姿勢を任意の方向に設定することが求められるためである。また、曲面の加工においては、上述したツールの姿勢制御に加え、ワーク形状を決定するツール先端の移動軌跡とその速度が設定値通りに実現されなければならない。こうした複雑な曲面の加工に対して、これまではNC言語のもつ直線や円弧補間機能を用いて、要求される加工精度が満足されるまで補間点を小さく与えるか<sup>3)</sup>、もしくは作業者によるマシニングセンタのマニュアル操作により各制御軸の移動パターンを求めていた。このため非常な労力と時間を要しており、5軸マシニングセンタを有効に活用しての複雑な曲面加工の自動運転が求められている。これより本研究では与えられた曲面を加工するために必要とされる5軸の駆動法について検討した。5軸マシニングセンタにおける駆動軸系は非直交座標系を構成しているため従来のNC言語のもつ直線や円弧補間では厳密に直線や円弧軌道を創成してくれない。本研究では上述の問題を解決する新しいNC制御技術を提案する。本研究で提案する新しいNC制御技術においてはこれまでのNC言語を用いることなく、5軸マシニングセンタの各駆動軸が必要とする移動量をその移動速度を含めパルス列の形式で、リアルタイムに得る方式として開発した。具体的には多関節型ロボットの制御と同様に、5軸マシニングセンタにおいても各駆動軸に座標系を設定し、その座標系を用いて計算されるヤコビ行列を用いることとした。

## 2. 5軸マシニングセンタのための新しいNCコントローラ

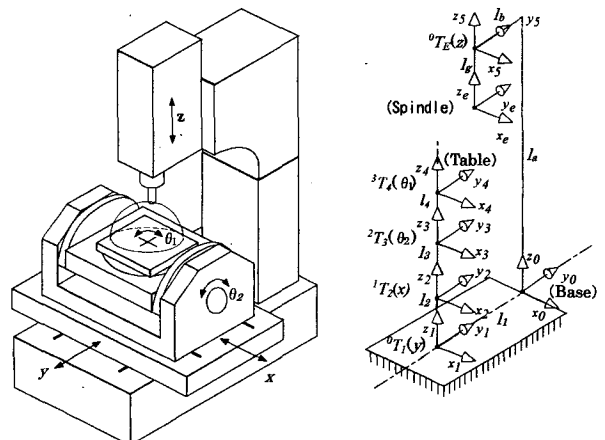
### 2.1 5軸マシニングセンタにおける座標軸の設定と順運動学

図1に本研究で対象とする5軸マシニングセンタとその駆動軸系に設定した座標系を示す。5軸マシニングセンタの支

柱部分(不動点)をベースとして座標系の設定を行う。不動点である支柱部分に基準座標系を与えた場合、ベースとスピンドル先端との位置関係は同次変換行列 ${}^0T_B(z)$ により与えられる。ここに $z$ はツールもしくはスピンドルの送り量である。他の駆動軸 $y, x, \theta_2, \theta_1$ についても同様に座標系を設定すれば、ベースを基準として、それぞれの同次変換行列 ${}^0T_1(y), {}^1T_2(x), {}^2T_3(\theta_2), {}^3T_4(\theta_1)$ が定義できる。ここで、テーブルとスピンドル先端との相対的位置関係は式(1)のような同次変換行列 $T_{CAD}$ で表現できるため、

$$T_{CAD} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)を用いれば式(2)が成立することになる。



$${}^0T_1(y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -l_1 + y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1T_2(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^2T_3(\theta_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & -s_2 & 0 \\ 0 & s_2 & c_2 & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4(\theta_1) = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^0T_5(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -l_5 \\ 0 & 0 & 1 & l_5 + z - l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} s_i = \sin \theta_i \\ c_i = \cos \theta_i \end{matrix}$$

Fig.1 5-axis control machining center

\* 原稿受付 平成13年 5月 17日  
\*\* 正会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)  
\*\*\* 金沢大学工学部

$${}^0T_1(y) \cdot {}^1T_2(x) \cdot {}^2T_3(\theta_2) \cdot {}^3T_4(\theta_1) \cdot T_{CAD} = {}^0T_E(z) \quad (2)$$

式(2)は、支柱部分をベースとし、スピンドル先端の同じ位置・姿勢を別々の経路で表現したものである。なお、式(1)で定義した  $T_{CAD}$  の中でワークのもつ形状データから与えられるデータ部分はワークの大きさを決定する  $P_x, P_y, P_z$  とその点における法線方向ベクトル  $[R_{13}, R_{23}, R_{33}]^T$  のみである。 $T_{CAD}$  にはワークに与える形状データを含ませることになり、マシニングセンタでは希望とするワークの形状データを与えて、それを実現する各軸の送り量を求めることになる。そのためには下式(3)の方程式を解くことが必要になる。

$$({}^3T_4(\theta_1))^{-1} \cdot ({}^2T_3(\theta_2))^{-1} \cdot ({}^1T_2(x))^{-1} \cdot ({}^0T_1(y))^{-1} \cdot {}^0T_E(z) = T_{CAD} \quad (3)$$

$$({}^0T_1(y))^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 - y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ({}^1T_2(x))^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$({}^2T_3(\theta_2))^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & s_2 & -l_3 \cdot s_2 \\ 0 & -s_2 & c_2 & -l_3 \cdot c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ({}^3T_4(\theta_1))^{-1} = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式(3)に示されているように、テーブルから見たスピンドル先端の移動の中で  $\theta_1, \theta_2, x, y$  についてはベースを基準として設定したもとの座標系がもつ運動方向とは逆になってくる。式(3)が、5軸マシニングセンタにおける、ロボット工学の中で用いられるいわゆる順運動学<sup>2)</sup>に相当するものである。

### 2.2 5軸マシニングセンタにおけるヤコビ行列

テーブルから見たスピンドル先端の速度  $\dot{r}$  と5軸マシニングセンタの各駆動軸速度  $\dot{q}$  とはヤコビ行列  $J_v$  を用いて式(4)のような関係を持つ。

$$\dot{r} = J_v \cdot \dot{q} \quad J_v: 6 \times 5 \quad (4)$$

$$\dot{r} = [\dot{p}_x, \dot{p}_y, \dot{p}_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$$

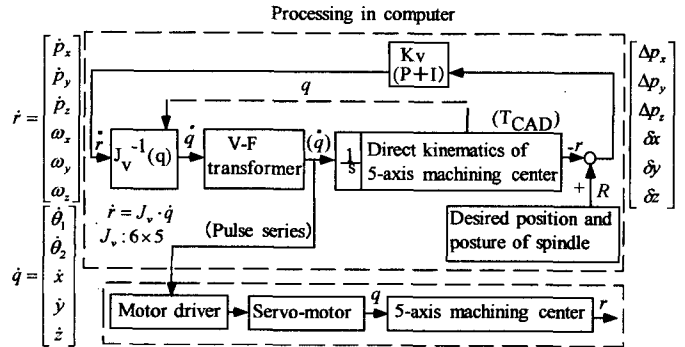
$$\dot{q} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$$

ここで  $[\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$  はテーブルから見たスピンドル姿勢の変化を表す角速度ベクトルである。式(4)で用いた5軸マシニングセンタにおけるヤコビ行列は6行5列であるため、その逆ヤコビ行列の計算<sup>2)</sup>には特異値分解に基づく擬似逆行列の計算を必要とする。図1で示した構造の5軸マシニングセンタにおけるヤコビ行列を具体的に式(5)に示す。

$$J_v = [J_{v1}, J_{v2}, J_{v3}, J_{v4}, J_{v5}] \quad (5)$$

$$J_{v1} = \begin{bmatrix} P_y - l_g c_1 s_2 \\ -P_x + l_g s_1 s_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$J_{v2} = \begin{bmatrix} s_1(l_g s_2 + (l_a + z)c_2 - (l_1 - y)s_2 - l_2 c_2) - l_g c_2 s_1 \\ c_1(l_g s_2 + (l_a + z)c_2 - (l_1 - y)s_2 - l_2 c_2) - l_g c_2 c_1 \\ l_g c_2 - (l_a + z)s_2 - (l_1 - y)c_2 + l_2 s_2 + l_g s_2 \\ -c_1 \\ s_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$



$$T_{CAD} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R: [p_x, p_y, p_z]^T, [R_{13}, R_{23}, R_{33}]^T$$

$$R_{11} = c_1 \quad R_{12} = c_2 s_1 \quad R_{13} = s_1 s_2$$

$$R_{21} = -s_1 \quad R_{22} = c_1 c_2 \quad R_{23} = c_1 s_2$$

$$R_{31} = 0 \quad R_{32} = -s_2 \quad R_{33} = c_2$$

$$P_x = -l_g s_1 c_2 + (l_a + z)s_2 s_1 + (l_1 - y)s_1 c_2 - x c_1 - l_2 s_1 s_2 - l_3 s_1 s_2 - l_g s_1 s_2$$

$$P_y = -l_g c_1 c_2 + (l_a + z)c_1 s_2 + (l_1 - y)c_1 c_2 + x s_1 - l_2 c_1 s_2 - l_3 c_1 s_2 - l_g c_1 s_2$$

$$P_z = l_g s_2 + (l_a + z)c_2 - (l_1 - y)s_2 - l_2 c_2 - l_3 c_2 - l_4 - l_g c_2$$

Fig.2 New NC controller for 5-axis machining center

$$J_{v3} = \begin{bmatrix} -c_1 \\ s_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad J_{v4} = \begin{bmatrix} -s_1 c_2 \\ -c_1 c_2 \\ s_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad J_{v5} = \begin{bmatrix} s_1 s_2 \\ c_1 s_2 \\ c_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

式(5)で示したヤコビ行列は5軸マシニングセンタのもつ軸系の構成に依存する。

### 2.3 新しいNCコントローラとその詳細

本研究で提案する新しいNCコントローラは、これまでのNCコントローラが持たない新たな機能を付加させようとするものであるため、NC言語を用いないことを前提とする。一方、通常のNC装置においては軸駆動のためのモータ駆動はパルス列を用いて行うことが多いため、本研究でも各軸駆動用のパルス列をリアルタイムに得ることを目標とする。図2に本研究で提案する、5軸マシニングセンタにおける順運動学とヤコビ行列とを用いて構成する新しいNCコントローラを示す。新しいNCコントローラはすべてソフト的に計算機中で構成する。同制御系中にはモータ駆動のためのパルス列発生用のV-F変換器<sup>6)</sup>を含み、V-F変換器の出力として得られるパルス列が各軸駆動用のパルス列となる。与えられたワーク形状のデータと5軸マシニングセンタの順運動学により得られるスピンドル先端の位置・姿勢を比較し、それぞれの誤差をフィードバックする。そしてそれらを逆ヤコビ行列を用いて各軸の駆動速度へ変換し、それらの値をV-F変換することにより各軸駆動用のパルス列をリアルタイムに得ている。と同時に再び5軸マシニングセンタの順運動学の計算を行い、その結果として得られる新たなスピンドル先端の位置と姿勢をワーク形状データと比較している。本研究で提案する図2に示すNCコントローラの中で、与えられたワーク形状のデータと順運動学により得られるスピンドル先端との位置誤差  $\Delta P_x, \Delta P_y, \Delta P_z$  についてはそれらの相対的差として非常に単純にかつ一意的に求められるが、スピンドル姿勢を

修正するためにテーブル座標系の各軸まわりに回転させる微小回転量  $\delta_x (= \omega_x \cdot \Delta t)$ ,  $\delta_y (= \omega_y \cdot \Delta t)$ ,  $\delta_z (= \omega_z \cdot \Delta t)$  は一意に定まらず、その組み合わせは無限に存在する。これより本研究では、マシニングセンタのもつ特異姿勢を回避する観点からも、ロボット工学における可操作性<sup>2)</sup>の概念を用いて、最も可操作性を大きくする軸に関しての微小回転を採用するものとする。

$R_1$  をテーブル座標系に対するスピンドルの目標姿勢ベクトル  $R_1 = [R_{13}, R_{23}, R_{33}]^T$  とし、 $R_2$  をテーブル座標系に対するスピンドル姿勢の現在値ベクトルとしたとき、テーブル座標系の各軸まわりの微小回転量  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_z$  とスピンドル姿勢を表わす  $R_1$ ,  $R_2$  との関係は近似的に

$$\begin{bmatrix} 1 & -\delta_z & \delta_y \\ \delta_z & 1 & -\delta_x \\ -\delta_y & \delta_x & 1 \end{bmatrix} \cdot R_1 \doteq R_2 \quad (6)$$

のように表される。式(6)を満足する  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_z$  の組み合わせは無限に存在しているが、マシニングセンタのもつ特異姿勢の回避を考慮した微小回転量について以下のような求め方を提案する。テーブル座標系の各軸まわりの微小回転量  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_z$  とマシニングセンタの回転軸  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  における微小回転量  $\Delta \theta_1$ ,  $\Delta \theta_2$  との間には式(5)のヤコビ行列より

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -c_1 \\ 0 & s_1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

なる関係が成立している。これより回転軸  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  に関する可操作性について評価する。 $\delta_z = 0$  とした時の可操作性  $w_1$  は

$$w_1 = \left| \det \begin{bmatrix} 0 & -c_1 \\ 0 & s_1 \end{bmatrix} \right| = 0 \quad (8)$$

となり、図1のような座標軸系を構成するマシニングセンタにおいては、可操作性の観点から  $\delta_z \neq 0$  としなければならないことになる。他方、 $\delta_x = 0$  あるいは  $\delta_y = 0$  とした時の可操作性  $w_2, w_3$  はそれぞれ

$$w_2 = \left| \det \begin{bmatrix} 0 & s_1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \right| = |s_1|$$

$$w_3 = \left| \det \begin{bmatrix} 0 & -c_1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \right| = |c_1| \quad (9)$$

となる。以上の考察より、 $\theta_1$  軸の回転量により、 $|s_1| \geq |c_1|$  である場合には  $\delta_x = 0$  とおき、式(6)を用いて  $\delta_y$ ,  $\delta_z$  を、また反対に  $|s_1| < |c_1|$  の場合には  $\delta_y = 0$  とおき、同様に式(6)を用いて  $\delta_z$ ,  $\delta_x$  を求めることになる。

### 3. 計算機シミュレーションによる制御性能の評価

計算機シミュレーションにより本研究で提案するNCコントローラの制御性能を評価する。スピンドル先端に球面の一部である円弧軌道を描かせることを試みる。図3に示す円弧軌道は、テーブルy軸上A点からスタートし、同じくy軸上B点に至る半円であり、円弧の中間点Cはz軸とx軸の間を通る軌道である。この円弧軌道上の多くの点列をワークのも

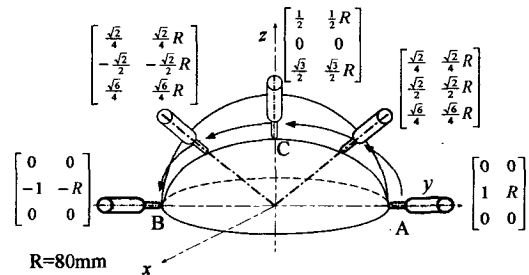


Fig.3 Cutting path and posture of spindle

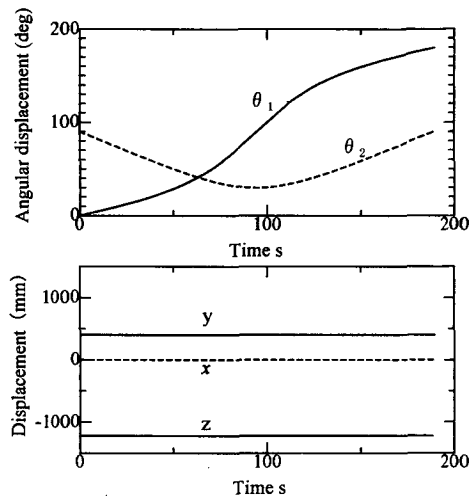


Fig.4 5-axis displacements

つ形状データとしてNCコントローラに与えることとする。図3中にはデータとして与える形状データの代表的5ヶ所についてその点の位置  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  とその点における法線方向である円弧中心の方向  $R_1 = [R_{13}, R_{23}, R_{33}]^T$  を示している。これよりスピンドルが常に円弧中心を向き、かつスピンドル先端が目標とする円弧軌道を一定速度で描くように5つの軸が制御される。

図2に示すNCコントローラを用いて、図3の作業例を実施した。この結果としての5つの各軸の運動の様子を図4に示す。円弧軌道であるためマシニングセンタにおけるx, y, z軸の移動はなく、 $\theta_1, \theta_2$  軸のみの移動で所望の円弧軌道を描いてくれることがわかる。図2のNCコントローラはワークの形状データと加工面の法線方向を時々刻々に与えることによりワークを加工するものであり、このためワークのもつ形状データ間の時間を指定することにより各駆動軸の送り速度が制御されることになる。このためNCコントローラに与えるワーク形状データのタイミングを変化させることによりリアルタイムに加工速度を変化させられる。

図2のNCコントローラへワークの形状データと加工面のもつ法線方向を入力したとき図2に示すNCコントローラのもつループ内のデータの流れを考察する。図5は、図3の作業例を実施中の、0~1秒間におけるV-F変換器の出力である各軸駆動用のパルス列の様子である。 $\theta_1$  と  $\theta_2$  軸には多くのパルス出力がみられるが、x, z軸にはパルス出力はない。y軸にパルス出力が見られるが正転パルスと逆転パルスが相殺するため結果的にはy軸の移動はない。図6は、目標値として円弧軌道を与えたときの0~1秒間におけるスピンドル先端の位置誤差  $\Delta P_x$ ,  $\Delta P_y$ ,  $\Delta P_z$  と式(6)を用いて計算したスピン

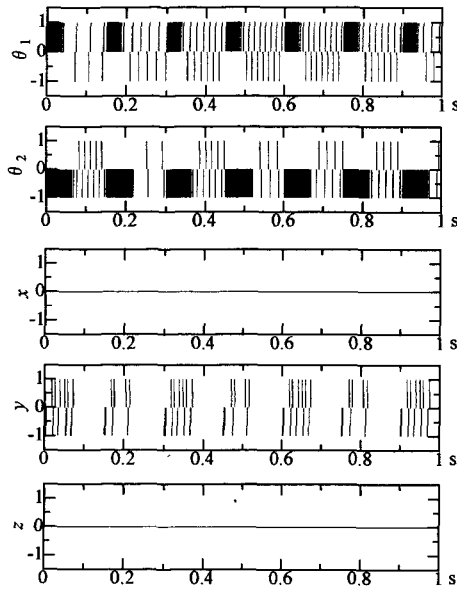


Fig. 5 Pulse series of 5-axis machining center

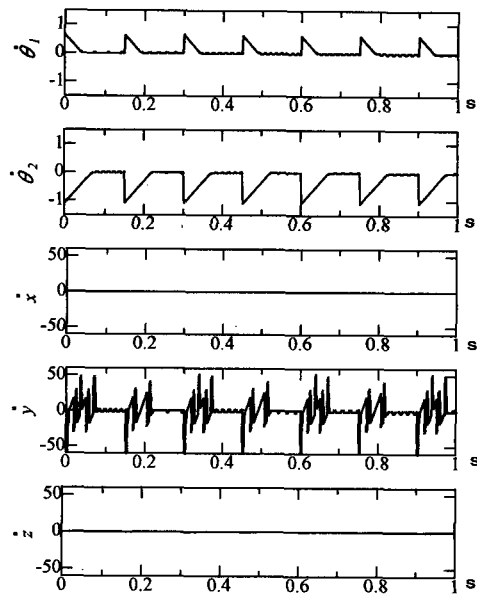


Fig. 7 Velocity of 5-axis machining center

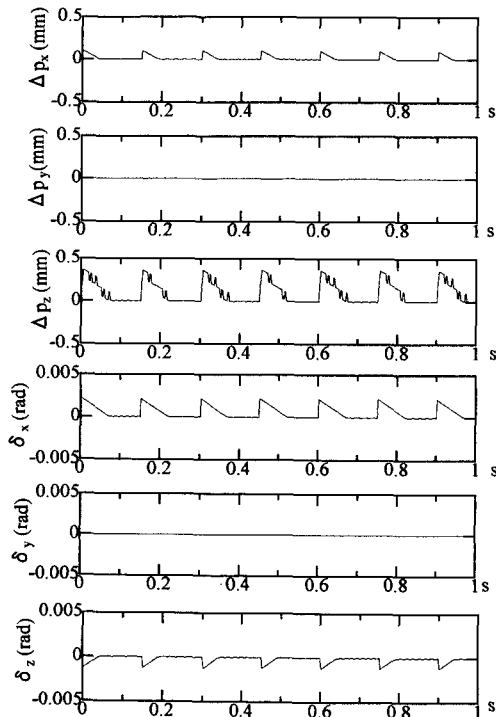


Fig. 6 Relative errors between the table and spindle

ドル姿勢の誤差  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_z$  を示す。この区間では可操作性の評価より  $\delta_y=0$  と与えて姿勢誤差を  $\delta_z$  と  $\delta_x$  を用いて表現している。また図7は上述の位置と姿勢の誤差を擬似逆行列を用いて計算して得た各駆動軸における回転及び並進速度である。

#### 4. 考 察

5軸マシニングセンタの使用中はツールの変更は当然のことであり、図2に示すNCコントローラの中でツール長の変更は最も起こりやすいパラメータ変化である。ヤコビ行列には基準となるパラメータを用い、5軸マシニングセンタの

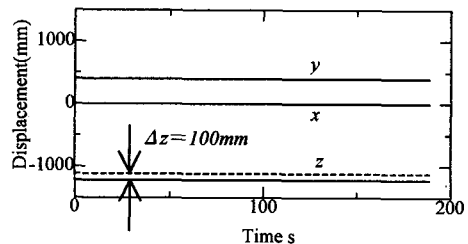


Fig. 8 Robustness of the new NC controller

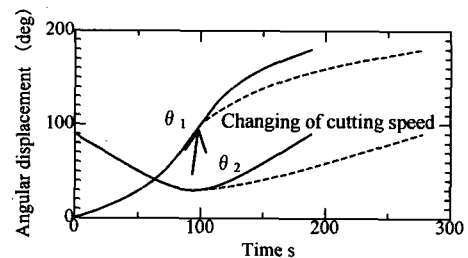


Fig. 9 Real time control of the new NC controller

順運動学中のツール長に対応するパラメータのみを変更するだけで図2に示すNCコントローラは動作可能であることを図8に示す。図8は、スピンドル長が100mmだけ短くなったにもかかわらず図3に示す加工を可能にしてくれることを示すシミュレーション結果である。ヤコビ行列中のツール長に対応するパラメータを変化させる必要はなく、ツール長の変化に対して図2に示すNCコントローラはロバストであることが確認できた。

本研究で提案する図2に示す新しいNCコントローラは、ワーク形状データと加工面の法線方向を時々刻々に与える方式であるため、加工速度をリアルタイムに変更できる。これまでのNCコントローラは各軸駆動用のパルス列をオフラインであらかじめ作成しておくことが必要なため、加工速度をリアルタイムに変更することは困難であった。これに対して実際の作業中では加工速度をリアルタイムに変更してびびり

振動の発生を回避したいという要求もある。図2に示すNCコントローラを用いてリアルタイムに100秒後の加工速度を半分にしたシミュレーション結果を図9に示す。図2に示すNCコントローラにおいては目標値であるワーク形状データを制御系に送り出す時間間隔を自由に設定可能なため、いかなる加工速度あるいはいかなるワーク形状の変化にもリアルタイムに対応できる。

## 5. 結 言

本研究ではNC言語を用いない、これまででない新しいNCコントローラの提案を行った。本研究を通して得られた結論をまとめ以下に述べる。

- (1) 5軸マシニングセンタ軸系に座標系を設定することによって5軸マシニングセンタのための新しいNCコントローラを構築した。そして曲面加工作業例により本コントローラの性能を詳細に評価した。
- (2) 本コントローラはツールの長さ変化に対して順運動学のみの変更で対応可能であることを示した。
- (3) NCコントローラは本来リアルタイム制御が困難であるが、本研究で提案するNCコントローラは加工速度および加工物形状のリアルタイム制御も可能である。

本研究では図1に示すような構造の5軸マシニングセンタを扱ってきたが、ほかの構造の5軸マシニングセンタにおいても全く同様に当てはめて考えることができる。また実

際の加工には工具の持つオフセットの問題があるが、ボールエンドミル等のツールを用いた場合には5軸マシニングセンタであってもワーク形状データに逆オフセット<sup>7)</sup>を設ければ解決できるものと思われる。なお、本研究の一部はマザック財団の助成によって行われたことを付記し感謝申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 稲崎一郎, 岸波建史, 坂本重彦, 杉村延広, 竹内芳美, 田中文基: 工作機械の形状創成理論, 養賢堂(1999)
- 2) 吉川恒夫: ロボット制御基礎論, コロナ社(1988)
- 3) 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ッサの研究, 精密工学会誌, 58, 9(1992) 1586
- 4) 竹内芳美, 和田一啓, 久木達也, 横山信人: 5軸制御マシニングセンタ用ポストプロセッサの研究—スピンドルチルト型, テーブル・スピンドルチルト型の場合—, 精密工学会誌, 60, 1(1994) 75
- 5) C. C. Cheah, S. Kawamura and S. Arimoto: Feedback Control for Robotic Manipulator with an Uncertain Jacobian Matrix, Journal of Robotic Systems, 16, 2(1999) 119
- 6) 張 勤, 神谷好承, 関 啓明, 疋津正利: NC制御とセンサフィードバックとの融合, 精密工学会誌, 65, 4(1999) 559
- 7) 鈴木裕, 黒田豊, 坂本正史, 元村直行: 金型実時間加工用数値制御システムの開発, 一逆オフセット法に基づくCAMの実時間処理化—, 精密工学会誌, 57, 3(1991) 75