セグメント間の加減速運動に起因するマシニングセンタの
直線補間工具経路の誤差推定*丘 華^{*1}, 久保明雄^{*1}, 岡本経寿^{*2}Error Estimation to Linear Interpolation Cutter Path of
Machining Center due to Acceleration/Deceleration Motions
between Two Interpolation SegmentsHua QIU^{*3}, Akio KUBO and Norihisa OKAMOTO^{*3} Department of Mechanical Engineering, Kyushu Sangyo University,
2-3-1 Matsukadai, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 813-8503 Japan

This paper proposes a practical approach to estimating the path errors produced by the NC acceleration/deceleration motions around connection points between every two segments for a linear interpolation cutter path of a machining center. The approach consists of two parts. The first is an experimental method to identify the value of each related parameter in NC apparatus to the acceleration/deceleration motion control, in which only an operation is needed to measure a few simple motion trajectories with two linear segments with the machining center. The other part is a concise and efficient simulation algorithm based on the identification results for a cutter path composed of a number of short linear segments. A comparison result of the simulated cutter path trajectories with the measured ones and contours of machined work pieces sufficiently demonstrates the effectiveness and reliability of the proposed approach. Therefore, as a useful tool, the approach is applicable to beforehand estimating the influence of the NC acceleration/deceleration motions on cutter path accuracy or judging the cutting conditions for the machining purpose without performing an actual machining test with the machining center.

Key Words: Machining Center, Cutter Path, Motion Trajectory, Error Estimation, Parameter Identification, Linear Interpolation, Acceleration/Deceleration Control, Simulation

1. 緒 言

マシニングセンタ(以下, MC と略す)の工具経路を直線で補間する場合, 二つの補間セグメントの間にドウェルを設けなければ, 加工されたワークの輪郭はシャープな形にならず丸みを持つ形状になることがよく知られている⁽¹⁾⁽²⁾. その原因はセグメント間のNC加減速運動(以下, 加減速運動と略す)である. セグメントが長い場合, 丸み誤差(コーナ部誤差)は前後のセグメント間のつながり部のみに現れ, その大きさと形状はMCのNC装置内部に用いた加減速運動の制御則と工具送り速度の値によって決まる⁽³⁾⁽⁵⁾. したがって, NC装置内部の加減速制御の方式と関連パラメータの値がわかれば, 切削実験せずに切削条件に対応するコ

ーナ部誤差を把握することができる. しかし, 通常ではMCの使用者にとってこのようなNC装置内部制御方式の詳細とパラメータの値は開示されていない.

一方, 曲線輪郭を精密に加工する場合は, 補間セグメントが短く設定されるので, セグメント間の加減速運動は前後のセグメントのつながり部だけでなく, 後続するセグメントまでに影響を及ぼすことがある. この場合, セグメント間の加減速運動は輪郭全般の精度に影響することとなる. しかし, この問題に関する研究はあまり公表されていない⁽⁶⁾.

以上のことをふまえて, 本研究では, まず極少回数の簡単なMC直線補間運動の軌跡を測定し, その結果から補間セグメント間のNC加減速運動制御パラメータを同定する方法を提案する. また, 同定結果を用いて推定した工具経路の軌跡を実測したMCの運動軌跡と比較し, 提案方法の有効性を確認する. 次に, 多数の短い直線セグメントからなる工具経路を対象とし, MCの加減速運動制御パラメータに基づいて, 工具経路

* 原稿受付 2010年3月29日.

^{*1} 正員, 九州産業大学工学部(〒813-8503 福岡市東区松香台2-3-1).^{*2} 九州産業大学大学院工学研究科[現: 大分キャンパス(株)](〒873-0292 国東市安岐町下原710)].

E-mail: chiu@ip.kyusan-u.ac.jp

軌跡のシミュレーション方法を提案する。さらに、シミュレーションした工具経路の軌跡結果を実測した MC の運動軌跡および加工したワークの実測輪郭と比較することにより、提案方法の妥当性を示す。

2. 加減速運動制御パラメータの同定法

2・1 直線補間運動によるコーナ部誤差 図 1 に MC の直線補間運動におけるコーナ部誤差の発生機構を示す。図中の x 軸と y 軸は運動平面を構成する MC の第 1 と第 2 の駆動軸である。点 S から点 A まで送り速度 v_1 で、点 A から点 E へ送り速度 v_2 で直線補間運動を指令する場合、セグメントの接続点 A でドウェルを設けなければ、MC の実運動軌跡は点 A のまわりに図示するような近回りの形になり、加工されたワーク輪郭はシャープな角を持たずに丸みを帯びた形状になる。このコーナ部誤差の形成は、前のセグメントが点 A より前の点 B で減速し始め、わずかに遅れて次のセグメントが点 A より前の点 C で加速し始めるからである。図 2 に示すように、点 A まわりの二つのセグメント接続部における x 軸の送り速度成分 v_x は、 v_{1x} から 0 への減速運動および時間 Δt 遅れて開始する 0 から v_{2x} への加速運動の合成運動速度になる⁽⁴⁾。 y 軸の送り速度成分 v_y の変化も類似する形になる。その結果、MC の実運動軌跡には図 1 に示すようなコーナ部誤差が発生する。

したがって、使用する MC の各サーボ軸（駆動軸）のセグメント接続点間の NC 加減速運動制御方式とタイミングパラメータがわかれば、コーナ部誤差を推定することができる。

2・2 供試 MC の加減速運動制御パラメータ 本研究に対象とする MC はワシノ製のセミクローズドループ方式の WMC-4 立形中型 MC である。その X 軸、 Y 軸、 Z 軸の移動範囲はそれぞれ 900 mm, 450 mm, 510 mm である。NC システムは FANUC Series 0-MB であり、同時制御軸数は 2.5 軸、最小設定単位は 1 μ m である。テーブルの案内方式は滑り案内であり、テーブルの構造は X 軸テーブルが Y 軸テーブルの上に載せられた構造である。また、最大切削送り速度は 5000 mm/min である。

対象 MC の NC システムの取扱説明書⁽⁷⁾によれば、切削送りの加減速運動制御は指数関数形加減速方式が採用されている。それに基づいて、本研究では駆動軸が v_0 から 0 に減速するときの送り速度 v について次式で定義する。

$$v = v_0 e^{-\frac{t-t_1}{T}} \quad (1)$$

また、駆動軸が 0 から v_0 へ加速するときの送り速度 v

Fig. 1 Corner error

Fig. 2 The x axis feed rate change between two segments

については次式で定義する。

$$v = v_0 \left(1 - e^{-\frac{t-t_2}{T}} \right) \quad (2)$$

ここで、 t は時間、 T は駆動軸サーボ系の時定数、 t_1 と t_2 は加減速運動制御のタイミングパラメータである。

タイミングパラメータ t_1 の値について次のような仮定をする。駆動軸は現在の速度 v_0 から 0 へ減速して、速度が 0 になったときにセグメントの指令位置に到達することとする。したがって、減速運動に対する駆動軸の通過距離 l は次式となる。

$$l = \int_0^\infty v_0 e^{-\frac{t}{T}} dt = v_0 T \quad (3)$$

この関係から、駆動軸が v_0 の速度で l を通る時間は T であることがわかる。したがって、駆動軸が v_0 の速度でセグメントの指令終点に到達する時刻 t_0 から T を引く時刻は減速の開始時刻となる。すなわち、

$$t_1 = t_0 - T \quad (4)$$

一方、タイミングパラメータ t_2 は NC 装置内部のセグメント処理に関するパラメータであり、図 2 に示した関係から次のように表される。

$$t_2 = t_1 + \Delta t \quad (5)$$

したがって、供試 MC の NC 加減速運動制御パラメータは X 軸、 Y 軸と Z 軸サーボ駆動系の時定数 T_x , T_y , T_z および各軸に対応する Δt である。

2・3 制御パラメータの同定実験と結果検証 供試 MC の加減速運動制御パラメータの値を定めるために、既報の LM (Link Mechanism) 測定装置⁽⁸⁾⁽⁹⁾を使用して、MC の XY 平面と YZ 平面に図 3 に示す直角運動軌跡をそれぞれ一回測定する。図中の座標系は LM 測定装置の測定座標系⁽⁸⁾⁽⁹⁾である。実験に使ったデータ記録サンプリングタイムを用いて運動軌跡の座標データについて数値微分をすると、各軸の送り速度成分を得ることができる⁽¹⁰⁾。さらに、各軸の送り速度成分データについて最小二乗法を使用し、式(1)と(2)に基づいてパラメータの最適値推定を行うことにより、各軸の時定数とタイミングパラメータ Δt の値を決める。

測定実験において、運動軌跡のサンプリングタイムを $480\mu\text{s}$ に設定し、運動軌跡にそって約 2000 点の座標を記録する。図 4 に同定実験の結果を示す。供試 MC の場合、各軸の Δt は同じ 0.007 s であり、 T_x , T_y , T_z の値はそれぞれ 0.0210 s , 0.0201 s , 0.0208 s である。一方、図中には同定した T_x , T_y , T_z および Δt の値を用いて推定した送り速度成分 $\dot{X}$, $\dot{Y}$, $\dot{Z}$ も示している。推定曲線と実測データによる曲線がよく一致していることから、同定結果は良好であると思われる。

同定結果の妥当性を検証するために、MC の XY 平面、 YZ 平面、 XZ 平面において図 5 に示す検証運動経路を NC プログラムにして MC の運動軌跡を測定した。各検証経路は点 A から、順次点 B, 点 C, 点 D, 点 A を通って、点 B で止まる。また、運動軌跡について等時間間隔で約 7750 点を記録した。

図 6 に角部の実測運動軌跡および同定パラメータによって推定した運動軌跡、図 7 には実測データの数値微分による軸の送り速度成分と同定データによる送り速度成分との比較例を示す。いずれの場合においても推定曲線は実験による曲線とよく一致している。ただし、図 6 のコーナ A とコーナ C の拡大図に示すように、推定した運動軌跡のコーナ部半径は実測した運動軌跡のそれよりやや小さくなり、位置も実測軌跡の外側になっている。両方の位置における最大差は、コーナ A では約 $45\mu\text{m}$ 程度、コーナ C では約 $20\mu\text{m}$ 程度である。この違いは供試 MC 駆動軸の運動方向の逆転におけるロストモーションやバックラッシュ補正などの影響によるものと思われる⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹¹⁾。ほかの運動平面に施した実験の結果も同様である。この結果から、提案した NC 装置内部の加減速運動制御パラメータの同定法および式(3)の仮定は妥当であることがわかった。

Fig. 3 Test path in the identification experiment

Fig. 4 Results of the identification experiments

Fig. 5 Test path to verify the identification result

以上では、指数関数形の加減速運動制御方式を例として NC 加減速運動制御パラメータの同定法を説明したが、この基本的な考え方はほかの加減速運動制御方式⁽⁴⁾にも適用できると思われる。また、MC の運動軌跡の測定に当たっては、交差格子スケール (クロスグリ

Fig. 6 Motion trajectory results in verification experiments

Fig. 7 Feed rate results in verification experiments

ッドエンコーダとも呼ばれる) による方法⁽¹²⁾⁽¹³⁾, または, NC 装置のフィードバック信号をモニターする方法⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾の利用も可能である。

3. 工具経路軌跡のシミュレーション方法

図8に示す MC の工具経路はつながり点でドウェルを設けない n 個の直線セグメントで構成される。指令位置として工具経路の開始点を $A_0(X_0, Y_0)$, i 番目セグメント($i=1, 2, \dots, n$)の終了点を $A_i(X_i, Y_i)$ とする。点 $B_i(x_{Bi}, y_{Bi})$ は i 番目セグメントの減速運動開始点, 点 $C_i(x_{Ci}, y_{Ci})$ は $i+1$ 番目セグメントの加速運動開始点である。 i 番目セグメントの指令送り速度を F_i とすると, それに対応する駆動軸 x と y の公称送り速度 F_{ix} と F_{iy} は次式による。

$$\begin{cases} F_{ix} = \frac{F_i(X_i - X_{i-1})}{\sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2}} \\ F_{iy} = \frac{F_i(Y_i - Y_{i-1})}{\sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2}} \end{cases} \quad (6)$$

Fig. 8 Cutter path consisted of linear segments

直線セグメントが短い場合に対して, 先行セグメント間の加減速運動の影響が後続セグメントの運動にも及ぶことを想定し, かつ, 工具経路軌跡のシミュレーション計算を容易に遂行することを考慮して, 本研究では, 各補間セグメントの加減速運動がそれぞれ独立に作動し, それらの合成運動によって工具経路の軌跡を決めるという前提条件を工具経路軌跡のシミュレーションに取り入れる。また, シミュレーションに必要な各セグメントの減速運動の開始タイミングと駆動軸が減速開始から完全に停止するまでの減速運動の作動時間については次のように決める。

3・1 各セグメントの減速運動開始タイミング

各セグメントの減速運動開始のタイミングに関しては, 各駆動軸の減速運動が式(3)の関係を満足するという仮定の下で, 駆動軸サーボ系時定数 T_x と T_y の値と無関係に次の関係が成立する (付録を参照)。

$$\Delta t_i = \frac{\sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2}}{F_i} \quad (7)$$

ここで, Δt_i は i 番目セグメントが加速運動開始点 C_{i-1} ($i=1$ の場合は点 A_0) から減速運動開始点 B_i までの運動時間である。その値は i 番目セグメントの公称送り時間 (式(7)右辺の値) と等しい。一方, 式(5)に示したように, セグメントの減速運動開始点と次のセグメントの加速運動開始点との間に対応する時間は Δt である。したがって, 最後のセグメント以外に各セグメントの実行時間は $\Delta t_i + \Delta t$ ($i=1, 2, \dots, n-1$) となる。

以下では, 区別するために, MC の運動開始からの累積時間を t , 各セグメントの加速過程と減速過程を記述する動作時間を τ と記す。

3・2 減速運動の作動時間

式(1)の定義によれば, 駆動軸が減速開始から完全停止までかかる時間は理論上無限大になる。シミュレーションではこの問題を次のように処理する。

駆動軸 x は, i 番目セグメントの減速運動開始点 B_i で公称送り速度 $F_{i,x}$ から減速し始め, セグメントの指令終点位置 X_i に十分近い位置 ($X \neq \delta$) に到達すると運動が止まるとする. したがって, 式(3)に基づいて, 停止位置に到達する減速運動の時間 ΔT は次式から求めることができる.

$$\left| F_{i,x} T_x - \int_0^{\Delta T} F_{i,x} e^{-\frac{\tau}{T_x}} d\tau \right| < \delta \quad (8)$$

駆動軸 y についても同様に考える.

式(8)の関係に基づいて, 計算を簡単にするためにシミュレーションの中では次式による ΔT の値を使う.

$$\begin{cases} \Delta T = T_{\max} \log_e \left\{ (F_{i,*})_{\max} T_{\max} / \delta \right\} \\ T_{\max} = \max(T_x, T_y) \\ (F_{i,*})_{\max} = \max(F_{i,x}, F_{i,y}) \quad (i=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (9)$$

したがって, n 番目セグメントの運動実行時間は $\Delta t_n + \Delta T$ となる. また, シミュレーション計算に δ の値として $1\mu\text{m}$ を用いた.

3.3 シミュレーションアルゴリズム 上述の結果に基づいて, 工具経路軌跡のシミュレーションアルゴリズムは以下になる.

(a) $i=1$ とする. 点 A_0 から点 B_1 までの駆動軸速度 $v_x(\tau)$ と $v_y(\tau)$ を式(10)から, 工具経路軌跡 $x(\tau)$ と $y(\tau)$ を式(11)から計算する.

$$v_m(\tau) = F_{1,m} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_m}} \right) \quad (10)$$

$$m(\tau) = F_{1,m} \tau - F_{1,m} T_m \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_m}} \right) + M_0 \quad (11)$$

ただし, 動作時間 τ は次式による.

$$0 \leq \tau = t \leq \Delta t_1 \quad (12)$$

ここで, 式の記述を簡明にするために, 個々の駆動軸を表す記号 x, y の代わりに共通の記号 m , 個々の座標 X, Y の代わりに共通の記号 M を使用する. 個々の駆動軸の送り速度と軌跡を計算するとき, m と M の箇所に対応する軸の x と X , または, y と Y を置き換えればよい. 誤解を起こさない限り後述の式も同様に取り扱う.

一方, 点 B_1 から点 C_1 までの駆動軸速度を式(13)から, 工具経路軌跡を式(14)から計算する.

$$v_m(\tau) = F_{1,m} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{T_m}} \right) e^{-\frac{\tau}{T_m}} \quad (13)$$

$$m(\tau) = F_{1,m} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{T_m}} \right) T_m \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_m}} \right) + m_{B1} \quad (14)$$

ただし, 動作時間 τ は次式による.

$$0 < \tau = t - \Delta t_1 \leq \Delta t \quad (15)$$

(b) $i=i+1$ と置き換える. 点 C_{i-1} から点 B_i までの駆動軸速度と工具経路軌跡をそれぞれ式(16)と式(17)から計算する.

$$v_m(\tau) = F_{i,m} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_m}} \right) + \sum_{j=J}^{i-1} F_{j,m} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_j}{T_m}} \right) e^{-\frac{\tau+t_{i-1}-t_j+\Delta t}{T_m}} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} m(\tau) = & F_{i,m} \tau - F_{i,m} T_m \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_m}} \right) + m_{C,i-1} + \\ & \sum_{j=J}^{i-1} \left\{ F_{j,m} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_j}{T_m}} \right) T_m e^{-\frac{t_{i-1}-t_j+\Delta t}{T_m}} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_m}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

ただし, 動作時間 τ は次式による.

$$\begin{cases} 0 < \tau = t - t_{i-1} - \Delta t \leq \Delta t_i \\ t_{i-1} = \sum_{j=1}^{i-2} (\Delta t_j + \Delta t) + \Delta t_{i-1} \end{cases} \quad (18)$$

式(16)と(17)における J は次式を満たす最小の j とする.

$$t_{i-1} + \Delta t - \Delta T < t_j \quad (j=1, 2, \dots, i-1) \quad (19)$$

(c) 点 B_i から点 C_i までの駆動軸速度と工具経路軌跡をそれぞれ式(20)と式(21)から計算する.

$$v_m(\tau) = \sum_{j=J}^i F_{j,m} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_j}{T_m}} \right) e^{-\frac{\tau+t_i-t_j}{T_m}} \quad (20)$$

$$m(\tau) = \sum_{j=J}^i \left\{ F_{j,m} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_j}{T_m}} \right) T_m e^{-\frac{t_i-t_j}{T_m}} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_m}} \right) \right\} + m_{B,i} \quad (21)$$

ただし, 動作時間 τ は次式による.

$$\begin{cases} 0 < \tau = t - t_i \leq \Delta t, & \text{for } i \neq n \\ 0 < \tau = t - t_n \leq \Delta T, & \text{for } i = n \end{cases} \quad (22)$$

(d) $i \neq n$ ならば (b) へ戻る. $i = n$ ならば, 計算を終了する.

上述のように, 各セグメントの加速運動に対する時間 Δt_i , 減速運動開始から次のセグメントの加速運動開始までの時間 Δt , および最後のセグメントの減速運動の作動時間 ΔT が前もって簡単に決められるので, 提案

Table 1 Motion conditions for test cutter path

Side length L (mm)	Feed rate F (mm/min)	Motion direction
5	500, 1000, 2000, 5000	Clockwise, Counter clockwise
2		
1

Fig. 9 Measured motion trajectories

アルゴリズムに基づく計算プログラムの作成は簡単に行える。

また、わずかな修正を施せば、提案アルゴリズムは、補間セグメントのつながり点でドウェルを設けた工具経路や3次元直線補間による工具経路にも適用できる。

4. 工具経路運動軌跡検証実験の結果

提案したシミュレーション方法の妥当性を確認するために、本章では、MC 運動軌跡のシミュレーション結果を運動軌跡の実測結果および加工したワークの輪郭と比較して検討を加える。

4・1 実測運動軌跡とシミュレーション運動軌跡との比較 LM 測定装置を使用して供試 MC の XY 平面、YZ 平面と XZ 平面に図 9 に示す正方形運動の軌跡を測定した。この運動経路は連続 3 周まわりで、つながり点にドウェルを設けない合計 12 個の直線セグメントからなる。実験経路の運動条件を表 1 に示す。また、運動軌跡について 1 周当たりに等時間間隔で約 1500 点を記録した。

図 10 に辺長 $L=5$ mm の MC 運動軌跡の実測結果とシミュレーション結果との比較例を示す。図中の矢印は運動方向を示す。図からわかるように、実測運動軌跡はシミュレーション軌跡とよく一致している。図 10 の実測運動軌跡を数値微分して得られた駆動軸の速度成分とシミュレーション速度成分を図 11 に示す。数値微分に起因した高周波数の変動成分が見られるが、実測軌跡による速度成分曲線はシミュレーション曲線とよく一致していることがわかる。

図 12 と図 13 にそれぞれ $L=2$ mm と $L=1$ mm の MC 運動軌跡の実測結果とシミュレーション結果との比較

Fig. 10 Comparison example of motion trajectories between estimation and measurement ($L=5$ mm)

Fig. 11 Comparison example of feed rates corresponding to the motion trajectories in Fig. 10

例を示す。 $L=2$ mm の場合に、シミュレーション運動軌跡と比べて、実測曲線角部の曲り半径がシミュレーション曲線のそれより大きくなり、 $F=5000$ mm/min のときは実測曲線の直線部分もやや曲るように見える。 $L=1$ mm の場合にはこの傾向がより顕著に見られる。この現象は供試 MC 駆動軸の運動方向の逆転におけるスティックモーションやロストモーションならびに MC のバックラッシュ補正の影響によるものと思われる^{(8),(9),(11)}。また、実測運動軌跡においては、スケール関係によって、運動経路の辺長 L が短ければ短いほど、補間セ

Fig. 13 Comparison example of motion trajectories between estimation and measurement ($L=1$ mm) Fig. 12 Comparison example of motion trajectories between estimation and measurement ($L=2$ mm)

グメント間の加減速運動に対してそれ以外の要因の影響が視覚的に大きく映され、より顕著に見られる。

図 14 に図 12 の実測運動軌跡を数値微分して得られた駆動軸の速度成分とシミュレーション速度成分を示す。運動軌跡のサンプル点間隔が短くなるので、実測結果による運動速度成分曲線に数値微分に起因する高周波数の変動成分が大きくなっているが⁽¹⁰⁾、実測結果による曲線とシミュレーション曲線との対応は確認で

Fig. 14 Comparison example of feed rates corresponding to the motion trajectories in Fig. 12

きる。また、図 11 と図 14 からわかるように、運動軌跡の辺長 $L=5$ mm の場合、各駆動軸の実送り速度の最大値がほぼ指令値に達したが、運動軌跡の辺長 $L=2$ mm の場合は、指令送り速度が増大するにつれて駆動軸の実送り速度の最大値が指令値に大幅に及ばなかった。その結果、運動軌跡の寸法も指令寸法よりはるかに小さくなっている。

一方、図 14 に示したように、辺長 L が短い場合に、指令送り速度の増加によって、MC の実運動時間は公称送り時間より大幅に増加している。これは各補間セグ

Fig. 15 Comparison example of estimated cutter path trajectories with measured work piece contours

メントの公称送り時間 Δt_i に対する補間セグメント間の NC 処理時間 Δt と最終セグメントの停止時間 ΔT の割合が大きくなるからである。例えば、 $L=2$ mm, $F=5000$ mm/min の場合に運動経路の公称送り時間 0.288 s に対して、セグメントの NC 処理時間の合計が 0.077 s, ΔT が 0.150 s であり、MC の総運動時間は 0.515 s となる。

また、ほかの運動条件で行った測定実験について検討した結果も上述と同様になっている。

4・2 実加工したワーク輪郭とシミュレーション工具経路運動軌跡との比較 直径 3 mm のエンドミルとナカニシ製の HES500 型高速スピンドルを使用して、供試 MC 上で厚さ 3 mm の A5052 アルミ板に四方形の通し穴を加工した。エンドミルの送り平面をそれぞれ MC の XY 平面, YZ 平面および XZ 平面に設定し、工具中心の経路を図 9 に示した経路を用いた。ただし、正方形の辺長 L の指令値を 2 mm にした。表 2 に切削条件を示す。

切削実験の際、XY 平面の工具経路の場合に、高速スピンドルを MC の主軸に、ワーク材を MC のテーブルに取り付ける。切削中に MC の主軸を回転させず、高速スピンドルはそのコントローラに設定された回転数でエンドミルを回転させる。NC プログラムによってテーブルを駆動しワーク材を送る。一方、YZ 平面と XZ 平面の工具経路の場合はワーク材を MC の主軸に固定し、高速スピンドルをテーブルに取り付けて送らせる。加工したワークの輪郭測定においては、ミットヨ製の BHN506 型三次元測定機を使用して輪郭 1 周に 520 点を測定した。使用するプローブの直径は 2 mm である。

図 15 に実測したワーク輪郭とシミュレーションした MC の工具経路軌跡との比較例を示す。図を見やすくするために、プローブ半径を補正せずに測定点に対するプローブ中心の座標を用いてワーク輪郭を表示している。したがって、使用したエンドミルとプローブ直径の関係から、図示するワーク輪郭は工具経路の外側軌

Table 2 Machining conditions for work piece

Cutting conditions	Spindle speed S (rpm) / Feed rate F (mm/min)	10000/500, 20000/1000, 30000/2000, 50000/5000
	Radial depth of cut (mm)	0.1
	Axial depth of cut (mm)	3
End mill	Diameter (mm)	3
	Flute number	2
	Helix angle ($^{\circ}$)	30
	Material	CO-HSS+TiN coating
Workpiece	Material	Duralumin A5052 plate
	Thickness (mm)	3

跡を 0.5 mm オフセットした曲線に相当する。図からわかるように、工具経路の開始・終了部を含めてシミュレーションした運動軌跡はワーク輪郭に一致している。ほかの運動平面に加工したワークの輪郭も同様な結果となっている。

前節と本節に述べた検証実験の結果から、提案した MC 工具経路軌跡のシミュレーション方法は妥当であることが確認された。

5. 結 言

本研究では、MC の使用者の立場から、セグメント間の NC 加減速運動に起因する MC の直線補間工具経路の誤差推定方法を検討した。その結果をまとめると、以下の通りである。

(1) 極少回数の簡単な MC 直線運動の軌跡測定結果に基づいて、補間セグメント間の指数関数形 NC 加減速制御パラメータを同定する方法を提案した。また、同定結果を用いて推定した工具経路の軌跡を実測した MC の運動軌跡と比較することにより、提案した方法の有効性を確認した。提案方法の基本的考え方はほかの NC 加減速運動制御方式のパラメータ同定にも適用可

能である。

(2) 多数の短い直線セグメントからなる工具経路を対象とし、MC の加減速運動制御パラメータに基づいて、工具経路軌跡を簡便にシミュレーションする方法を提案した。また、工具経路軌跡のシミュレーション結果を実測した工具経路軌跡および加工したワーク輪郭と比較することにより、提案したシミュレーション方法の妥当性を確認した。その結果、切削実験をせずに工具経路に及ぼす補間セグメント間の NC 加減速運動の影響を推定して把握することが可能となった。

最後に、MC の補間セグメント間の NC 加減速運動の影響に関してソフトウェアとハードウェアの両面から種々の改善対策が提案され⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、MC の加工精度が大幅に向上している今日にも、試切削をせずに NC 加減速運動の影響を把握し、切削パラメータの妥当性を検討できる点では、MC の使用者にとって、本研究に提案した方法は実用上意義があると思われる。

付録：数学帰納法による式(7)の証明

式(3)に基づいて、1 番目セグメントの減速運動開始点 B_1 において駆動軸速度 $v_m(\tau)$ と工具経路軌跡 $m(\tau)$ は次式を満足する。

$$v_m(\tau)T_m = M_1 - m(\tau) \quad (23)$$

式(10)と(11)を上式に代入して整理すると、点 B_1 における時間 τ について次の関係が得られる。

$$\tau = \frac{X_1 - X_0}{F_{1,x}} = \frac{Y_1 - Y_0}{F_{1,y}} = \frac{\sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2}}{F_1} \quad (24)$$

点 A_0 を基準として、点 C_1 から点 B_2 までの 2 番目セグメントの駆動軸速度と工具経路軌跡は次の式で記述できる。ただし、 $0 \leq \tau = t - \Delta t_1 - \Delta t$ である。

$$v_m(\tau) = F_{2,m} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_m}} \right) + F_{1,m} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{T_m}} \right) e^{-\frac{\tau + \Delta t_1}{T_m}} \quad (25)$$

$$m(\tau) = F_{2,m}\tau - F_{2,m}T_m \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_m}} \right) + F_{1,m}\Delta t_1 - F_{1,m} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{T_m}} \right) T_m \left(1 - e^{-\frac{\tau + \Delta t_1}{T_m}} \right) + M_0 \quad (26)$$

式(3)に基づき、点 B_2 において次式が成立つ。

$$v_m(\tau)T_m = M_2 - m(\tau) \quad (27)$$

式(25)と(26)を式(27)に代入し整理すると、

$$\begin{aligned} F_{2,m}\tau &= M_2 - F_{1,m}\Delta t_1 - M_0 \\ &= M_2 - M_1 + M_1 - M_0 - F_{1,m}\Delta t_1 \end{aligned}$$

よって、点 B_2 における時間 τ に対して次式が成立する。

$$\tau = \frac{X_2 - X_1}{F_{2,x}} = \frac{Y_2 - Y_1}{F_{2,y}} = \frac{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}}{F_2} \quad (28)$$

次に、 $i-1$ 番目のセグメントまでに各セグメントの加減速運動開始点から減速運動開始点までの動作時間 τ がすべて式(7)を満たすとする。点 A_0 を基準にして、点 C_{i-1} から点 B_i までの i 番目セグメントの駆動軸速度と運動軌跡は次の式で記述できる。ただし、 $0 \leq \tau = t - t_{i-1} - \Delta t$ である。

$$v_m(\tau) = F_{i,m} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_m}} \right) + \sum_{j=1}^{i-1} \left\{ F_{j,m} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_j}{T_m}} \right) e^{-\frac{\tau + t_{j-1} - t_j + \Delta t}{T_m}} \right\} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} m(\tau) &= F_{i,m}\tau - F_{i,m}T_m \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_m}} \right) + M_0 + \\ &\sum_{j=1}^{i-1} \left\{ F_{j,m}\Delta t_j - F_{j,m}T_m \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_j}{T_m}} \right) \right\} + \\ &\sum_{j=1}^{i-1} \left\{ F_{j,m} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_j}{T_m}} \right) T_m \left(1 - e^{-\frac{\tau + t_{j-1} - t_j + \Delta t}{T_m}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (30)$$

式(3)に基づき、点 B_i において次式が成立つ。

$$v_m(\tau)T_m = M_i - m(\tau) \quad (31)$$

式(29)と(30)を式(31)に代入し整理すると、

$$F_{i,m}\tau = M_i - M_0 - \sum_{j=1}^{i-1} F_{j,m}\Delta t_j$$

よって、点 B_i における時間 τ は次のように表される。

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{M_i - M_{i-1}}{F_{i,m}} + \frac{M_{i-1} - M_{i-2}}{F_{i,m}} + \dots + \frac{M_1 - M_0}{F_{i,m}} - \\ &\sum_{j=1}^{i-1} \frac{F_{j,m}}{F_{i,m}} \times \frac{\sqrt{(X_j - X_{j-1})^2 + (Y_j - Y_{j-1})^2}}{F_j} \\ &= \frac{M_i - M_{i-1}}{F_{i,m}} = \frac{\sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2}}{F_i} \end{aligned} \quad (32)$$

すなわち、点 C_{i-1} から点 B_i までの i 番目セグメントの動作時間 τ も式(7)を満足する。

文 献

- (1) Kwon, H. D. and Burdekin, M., Adjustment of CNC Machine Tool Controller Setting Values by an Experimental Method, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 38, No. 9 (1998), pp. 1045-1065.
- (2) Qiu, H., Takeshita, Y. and Takada, M., New Measurement Method for Motion Accuracy of NC Machine Tools by Link Mechanism (3rd Report,

- Measurement of Accuracy for Circular Motion with a Small Radius and Linear Motion Containing a Square Corner), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 64, No. 628 (1998), pp. 4850-4856.
- (3) Schmitz, T. and Ziegert, J., Dynamic Evaluation of Spatial CNC Contouring Accuracy, *Precision Engineering*, Vol. 24, No. 2 (2000), pp. 99-118.
 - (4) Shih, Y.-T., Chen, C.-S. and Lee, A.-C., Path Planning for CNC Contouring around a Corner, *JSME International Journal, Series C*, Vol. 47, No. 1 (2004), pp. 412-420.
 - (5) Matsubara, A., Hatozaki, T. and Ibaraki, S., Analysis of Motion Error of CNC Machine Tools (1st Report)—Analysis of Motion Error at the Corner—, *Proceedings of the 5th Manufacturing & Machine Tool Conference*, No. 04-3 (2004), pp. 119-120.
 - (6) Yan, X., Shirase, K., Kawabata, H., Hirao, M. and Yasui, T., Improving Productivity of Machining Centers Based on NC Program Diagnostic System (1st Report) — Evaluation of Productivity Using NC Program Simulator—, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 63, No. 7 (1997), pp. 1044-1048.
 - (7) FANUC LTD Co., The Instruction Manual of FANUC Series 0-MB, (1987), pp. 32-33, FANUC LTD Co.
 - (8) Qiu, H., Kubo, A., Li, Z.-Y. and Ikegami, H., Measurement of Machining Center Motion Trajectories within a Small Area, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72, No. 716 (2006), pp. 1034-1040.
 - (9) Kubo, A. and Qiu, H., Measurement of Small Size Motion Trajectories on Vertical Planes of Machining Center, *Journal of Japan Society for Design Engineering*, Vol. 42, No. 7 (2007), pp. 413-418.
 - (10) Qiu, H., Velocity Measurement for Planar Motions of Machines Using the LM Measuring Device, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 10, No. 4 (1998), pp. 358-363.
 - (11) Kakino, Y., Ihara, Y. and Nakatsu, Y., A Study on the Motion Accuracy of NC Machine Tools (2nd Report)—Diagnosis of Motion Error Origins by Using Double Ball Bar Test—, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 52, No. 10 (1986), pp. 1739-1745.
 - (12) Kakino, Y., Ihara, Y., Lin, S., Hayama, S., Kawakami, K. and Hamamura, M., Measurement of Motion Accuracy and Improvement of Machining Accuracy on Ultra-High Precision NC Machine Tools by Using Cross Grid Encoder Test, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 62, No. 11 (1996), pp. 1612-1616.
 - (13) Utsumi, K., Measurement Technology for Circular Motion Accuracy, *Science of Machine*, Vol. 50, No. 1 (1998), pp. 201-205.
 - (14) Yamanaka, M., Verification Method for Motion Accuracy and Servo Performance of Machines — Utilization of Motion Analyzer TPC —, *Science of Machine*, Vol. 50, No. 1 (1998), pp. 206-212.
 - (15) Nagashima, K. and Hirose, T., Contouring Path Deviation in CNC Machine Tools and Its Input-Adaptive System, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 65, No. 638 (1999), pp. 4230-4236.
 - (16) Takahashi, N., Iriguchi, K. and Kato, K., High Accuracy Surface Finish Using Surface Driven Interpolation NC by Acceleration Compensation, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 71, No. 10 (2005), pp. 1309-1314.