工作機械の送りテーブルの実時間動特性計測とそれに基づく軌跡制御*

—円弧補間加工における象限突起の抑制効果—

海野徹** 森本喜隆*** 市田良夫*** 佐藤隆之介***

Real-Time Synthesis and Control by Corrected Inverse Transfer Function of NC Tables
-Effects of Compensation at Quadrant Motion for Circular Interpolation-

Toru UNNO, Yoshitaka MORIMOTO, Yoshio ICHIDA and Ryunosuke SATO

This report proposes the suppression method of the stick motion at quadrant changes by the real-time inverse transfer function method without identifying the parameters previously. The dynamic characteristics of 2-axis NC table are identified by real-time calculation as the second regression function with consideration of variables for parameters during motion. The real-time compensation is executed by the identified parameters that show the characteristic values at quadrant changes. The trajectory error by the proposed method has been suppressed 37.1% of that by the conventional feedback control during air cutting. As the result of applying to the circular interpolation machining, the contoured profile of the workpiece by our method shows the suppression of 43.6% of the stick motion.

Key words: positioning control, NC table, inverse transfer function, circularity, quadrant change

1. 緒 言

NC テーブルの高速化に伴い、速度反転時の象限突起が円弧補間運動における軌跡誤差として大きな問題となっている^{1)~5)}。そのため独自の数値制御装置による逆伝達関数補償法^{6)~9)}や非最小位相系のサーボ系にも適用できるZPETC¹⁰⁾(Zero Phase Error Tracking Control)を用いたNCテーブルの位置決め制御に関する研究がなされている。しかしこれらの制御法には次のような問題もある。駆動系の動特性パラメータを決定するために制御対象の同定試験を行なう必要があり、さらに動特性が一定であると仮定し制御を行っている。ここで、移動距離が長くなると系の動特性が変化する場合があります、系の重心の移動や様々な動作環境の変動により動特性パラメータが変化することも考えられる。またこれら象限突起等の非線形特性は解析が困難であり、モデルベースで非線形特性を同定し制御する方法も提案されているが、正確にモデル化することは容易ではなく、かつ摩擦モデルを決定するために複雑な調整を必要とすることがある^{11)~19)}。

そこで本研究では象限突起部分の精度向上を目的に、系の数学モデルを仮定し、サンプリングタイム内において動特性パラメータの値を一定とみなす区分線形化による実時間逆伝達関数制御をNCテーブルに適用する。この手法は事前に動特性パラメータの同定試験を行なう必要がないという特徴を持つ。本報告では、円弧補間運動時の象限突起抑制効果および円弧補間加工による形状精度の改善効果を検証する。

2. 実時間逆伝達関数制御法

2.1 逆伝達関数のNCテーブルへの適用

入出力特性のモデル化を行なうために、系の伝達関数をラプラス領域において表現する。伝達関数はステップ応答を求め、出力をフーリエ変換し実測した。図1に計測した伝達関数を示す。図より伝達関数を通常の2次遅れ系として近似することできる。ここで工作機械では特に0Hzにおいて振幅比が厳密に1であることが望ましい。そこで図より系の伝達関数を、2次の伝達関数 $G(s)$ とみなし、また無駄時間を考慮すると次式となる。

$$G(s) = e^{-Ls} \cdot \frac{1}{1 + a_1s + a_2s^2} \quad (1)$$

ここで L は無駄時間であり、 a_1 は速度の係数の動特性パラメータ、 a_2 は加速度の係数の動特性パラメータである。伝達関数を式(1)と仮定することにより、逆伝達関数は不安定な極を持たず常に安定性が保たれる。二つのパラメータ a_1 、 a_2 は本来独立したパラメータではないが、本研究では独立したパラメータとして扱う。式(1)より修正指令値 $CI(s)$ は以下となる⁶⁾。

Fig.1 Typical measured transfer function

* 原稿受付 平成 19 年 4 月 20 日

** 学生会員 宇都宮大学大学院 (宇都宮市陽東 7-1-2)

*** 正 会 員 宇都宮大学工学部 (宇都宮市陽東 7-1-2)

Fig.2 Experimental setup of positioning system

$$CI(s) = \frac{1}{e^{-Ls}} \cdot (1 + a_1s + a_2s^2) \cdot I(s) \quad (2)$$

ここで、事前は無駄時間を除くと、式(2)は

$$CI(s) = (1 + a_1s + a_2s^2) \cdot I(s) \quad (3)$$

となる。

2.2 修正指令値の算出

工作機械の動特性は、重心の移動や駆動位置などにより変化する。そこで区分線形化により、十分短い動作区間内には動特性を一定とみなすことができると仮定し、実時間で動特性を速度の係数および加速度の係数として得ることができる。したがって動特性パラメータ a_1, a_2 は具体的なパラメータとして剛性および粘性係数等の物理的な意味を持たず、逆伝達関数制御における数学的パラメータとして考える。指令値の位置および速度をサンプリングタイムごとに分割し、第 n 番目の区間において式(3)を逆ラプラス変換すると、次式となる。

$$ci(t) = i(t_n) + a_{1n}i'(t_n) + a_{2n}i''(t_n) + a_{1n}i(t_n) + a_{2n}i'(t_n) \quad (4)$$

したがって動特性パラメータ a_1, a_2 が求まれば、式(4)により修正指令値が求まり逆伝達関数制御が可能となる。

2.3 実時間動特性パラメータの同定

動特性パラメータ a_1, a_2 は以下の式を用いて位置、速度、加速度からを求めることができる。

$$i(t_n) = r(t_n) + a_1(r'(t_n) + r(t_n)) + a_2(r''(t_n) + r'(t_n)) \quad (5)$$

ここで $r'(t_n), r''(t_n)$ は応答の速度、加速度である。式(5)により動特性パラメータを、指令値および実測値から 5 点を用いて最小自乗法により算出する⁶⁾。

3. 実時間逆伝達関数法によるパラメータの同定と修正指令値の算出

3.1 制御システムの概要

提案した手法の有効性を確認するために軌跡制御実験を行った。実験装置の概略を図 2 に示す。円弧補間運動は直交 2 軸の NC テーブルによる運動であり、実験装置も X 軸 Y 軸を持つ 2 軸テーブルとなっている。ところが案内をもつ 1 軸を X 軸とし AC サーボモータで駆動し、そして X 軸上に 2 軸目である Y 軸テーブルを載せ 2 軸 NC テーブルを構成した。目標値として X 軸に正弦波指令を、Y 軸に余弦波指令を与える。まず指令値と、エンコーダによって測定した現在位置とを用いて動特性パラメータ a_1, a_2 を同定する。そして同定した動特性パラメータを用い修正指令値を算出しサーボモータの駆動アンプに教示し、NC テーブルを駆動する。

この時これらの入力および出力を用いて再度パラメータを同定し修正指令値を演算する。これらの一連の動作を繰り返すことにより、実時間における逆伝達関数制御を実現する。ここでエンコーダの分解能は $0.73\mu\text{m}$ であり、制御周期は 2ms である。

3.2 象限突起の測定

速度反転時の軌跡誤差には突起が円の外側に突き出るスティックモーションや、段差を生じるロストモーションがあるが、本研究ではエンコーダにおいても確認が可能なスティックモーションを象限突起とよびその改善を目指す。図 3 に PID 制御を用い、エンコーダで測定した円弧補間運動の結果を示す。図中矢印で示した象限切替え時である 0, 90, 180, 270 度の 4 箇所に平均約 $13.2\mu\text{m}$ の象限突起が確認できる。ここで事前にテーブル端にリニアスケールを設置しテーブル移動量を測定した結果、エンコーダによる測定結果と同程度の象限突起が生じることを確認している。したがって以降はエンコーダ出力に基づく制御を採用した。

3.3 動特性パラメータの同定

実時間によるパラメータ同定の有効性を検討するため、提案する手法により動特性パラメータの同定を行った。フィードバック

Fig.3 Circular interpolation at quadrant motion from encoder

Fig.4 Identified parameters a_1, a_2

パラメータはあらかじめ設定された値を用いた。使用した実験装置では 6ms の無駄時間が存在するため、事前に遅れを取り除きパラメータを計算した。実験に用いた指令値は振幅 10mm、周期 10s の円弧運動である。図 4 上段に同定した動特性パラメータ a_1 を示す。制御系のゲインを設定し無駄時間を除去したことにより、計算式による極値、および象限突起にのみ偏差が存在する。そのため a_1 は極値と象限突起において特徴的な値を示すが、その他では値はほぼゼロとなっている。特に 2.5s、7.5s における象限突起では微小ではあるが特徴的なパラメータが生じている。図 4 下段に動特性パラメータ a_2 を示す。象限突起部分においても特徴的な値は生じていない。これらの結果より従来の逆伝達関数制御においては一定とみなしたパラメータが、実時間による同定によって変化するものとして捉えられることが確認された。

3.4 テーブル位置による動特性パラメータの変動

動特性パラメータが変動していることが確認されたため、本節ではテーブル位置によるパラメータの変化を、時間領域および周波数領域において検討した。テーブルストロークの中心を B 点とし、左右 50mm 離れた位置のモータ側を A 点、反対側を C 点とした 3 点において動特性パラメータ a_1 を測定した。図 5 に時間領域で測定したパラメータ a_1 をテーブル位置ごとに算出し、象限突起に相当する箇所を拡大し示す。A 点のピーク値を 100% とすると、B 点は 89.8% で、C 点は 75.9% であり、テーブル位置によってパラメータが最大で 24.1% 変化することがわかる。これらテーブル位置による動特性パラメータの違いはボールねじのねじり剛性、転がり軸受けの摩擦等の違いに起因すると考えられる。

次に周波数領域においてテーブル位置ごとに伝達関数を測定した結果を図 6 に示す。テーブル位置におけるパラメータの変動はほとんど確認できないので、2 次の伝達関数として近似を行った場合には同じようなパラメータを持つ。したがって通常の逆伝達関数制御は周波数領域においてパラメータを同定するため、テーブル位置によるパラメータの変動を捉えることは困難である。これに対して提案する手法は、実時間でパラメータを同定することにより、時間領域においてテーブル位置によるパラメータ変動をも制御に考慮することができ、より効果的な制御が可能になると考えられる。

3.5 修正指令値に占める動特性パラメータの影響

動特性パラメータ a_1, a_2 が変動することから、次にこれらパラメータが修正指令値に与える影響を検討した。図 7 上段に次式におけるパラメータ a_1 の項を、中段にパラメータ a_2 の項を、下段にパラメータ a_1 の項とパラメータ a_2 の項を合計し、最小位置決め分解能以下のデータを取り除いた修正項を示す。

$$ci(t) = i(t_n) + a_{1n}(i'(t_n) + i''(t_n)) + a_{2n}(i''(t_n) + i'''(t_n)) \quad (6)$$

これらの項は修正指令値として、指令値に替わり系に入力される値である。パラメータ a_1 の項は象限突起において特徴的な補正值が生じている。時間遅れを取り除いて計算した修正指令値では式(6)の右辺における a_1 の項と a_2 の項の大部分が最小分解能以下になり、図 3 の同定したパラメータに見られる極値は相殺される。パラメータ a_1 の項は、指令値の位置と速度による項であることから、位置指令の頂点にあたる象限突起部分で大きな補正が生じる。パラメータ a_2 の項は図 3 と同様に象限突起部分でパラメータ a_1 に見られた特徴的な値が算出されていない。下段に示す修正項は計算された実際の修正項に、最小分解能を参考に補正した修正項である。最終的に象限突起部分の 2 ヶ所に補正值が見られる。パラメータ a_1 の項と a_2 の項は 3 桁の値の違いがあるので、パラメー

タ a_1 の項とパラメータ a_2 の項の合計である修正項は、ほとんどパラメータ a_1 の項と同じである。よって動作速度が遅い領域では修正指令値の大部分はパラメータ a_1 に依存する。

4. 円弧補間運動による制御効果の確認

4.1 実時間逆伝達関数制御結果

提案する手法による軌跡制御結果を図 8 上段に示す。象限突起を打ち消すように修正指令値が算出され、逆伝達関数制御による

Fig.5 Differences of dynamic characteristics around quadrant motion in time domain

Fig.6 Differences of dynamic characteristics in frequency domain

Fig.7 Corrected terms in compensated input

Fig.8 Comparison of control results around quadrant motion

応答に対し、指令値を中心に対称となっている。これは動特性パラメータが実時間で計算されているので、応答の改善がその都度計算に反映されているためである。これにより応答に行き過ぎは発生していない。また制御結果はテーブルの停止時間を短縮し速度反転後の動作の開始が早まっている。その後多少の偏差を残しながら指令値によく追従している。PID 制御による応答と比較しても追従性が向上し、象限突起が大きく改善されていることが確認された。次に象限突起量を評価するために、PID 制御による偏差と、提案する制御による偏差を求め、図 8 下段に象限突起部分を拡大して示す。提案する制御による象限突起のピーク値は $10.7\mu\text{m}$ であり、従来の応答に対して約 37.1%減少し、軌跡精度は大きく改善されている。しかしピーク値は改善されるが、振動が生じる場合もある。これらの結果から、提案する手法は摩擦モデルを用いる方法とは異なり、事前に系の特性を測定することなしに指令値と応答のみで制御できるため、より簡便に象限突起を抑制できることが利点といえる。

本研究は円弧補間運動における象限突起の抑制が目的であるので、2 軸 NC テーブルにおける軌跡制御実験を行った。空運転時のテーブルの挙動をエンコーダにより測定し、提案する制御法と従来の PID 制御法による制御結果を比較検討した。図 9 の上段に象限突起部分を拡大した X 軸の偏差を、下段に Y 軸の偏差を示す。従来の応答には $17\mu\text{m}$ の象限突起が生じている。これに対して提案する制御法において、象限突起は $10\mu\text{m}$ に減少し、象限突起後の振動も比較的抑制されている。Y 軸は従来の制御法において $17\mu\text{m}$ の象限突起が生じているが、提案する制御法により、象限突起は $13.5\mu\text{m}$ に減少している。しかし、その後 X 軸と比較して大きく振動し、 $8\mu\text{m}$ の行き過ぎが生じている。これらの制御結果から、提案する手法により円弧補間運動においても十分な制御効果が得られることを確認した。

4.2 送り速度による制御効果の比較

送り速度を変化させ、空運転中の NC テーブルの挙動をエンコーダにより測定し象限突起の比較検討を行った。図 10 に測定結果を示す。横軸が送り速度、上段がパラメータ a_1 、中段がパラメータ a_2 、下段が従来の PID 制御による象限突起のピーク値および提案する制御によるピーク値である。送り速度は 0.202, 0.314, 0.753, 1.25, 1.57, 1.8, 2.07mm/min を用い、円弧直径はすべて 100mm とした。送り速度の増加とともにパラメータおよび偏差が指数関数的に増加している。送り速度が 0.314mm/min から 2.07mm/min に増加する間、パラメータ a_1 は約 2.2 倍に増加するのに対し、パラメータ a_2 は約 3.4 倍に増加している。これはパラメータ a_1 が速度の影響を受け、そしてパラメータ a_2 が加速度の影響を受けるためである。また送り速度の増加と共に象限突起の抑制量は増加しているが、象限突起抑制効果はわずかながら減少している。これらの結果から提案する制御法による制御効果は送り速度に依存すると考えられる。

Table 1 Cutting conditions

Spindle revolution	1340 rpm
Feed rate	202 mm/min
Coolant	Dry cut
Input signal	X-axis: cosine wave Y-axis: sine wave Amplitude 50 mm
Depth of cut	100 μm
Width of cut	10mm
Cutting tool	End mill HSS Diameter 10mm
Workpiece	A2017 Diameter 100 mm

4.3 指令値直径による制御効果の比較

指令値の振幅を変化させ、象限突起ピーク値の比較検討を行った。実験に用いた円弧直径は 15, 30, 60, 90, 100mm であり、送り速度は仕上げ加工を考慮してすべて 0.314mm/min とした。図 11 に測定結果を示す。上段がパラメータ a_1 で、中段がパラメータ a_2 、下段が PID 制御法による象限突起のピーク値および提案する制御法による象限突起のピーク値である。円弧直径の拡大とともに、パラメータおよび象限突起のピーク値が指数関数的に減少し、円弧直径が 60mm 以上においてパラメータ、ピーク値ともにほぼ一定となっている。象限突起抑制効果は円弧直径にかかわらず一定となり、象限突起を約 45%抑制した。

5. 加工実験による輪郭軌跡の評価

5.1 実時間制御による円弧加工

加工した工作物の輪郭形状を測定することにより、提案する手法の有効性を確認する。NC テーブル上に工作物を固定し、表 1 に示す加工条件により、エンドミルによる円弧補間加工を行った。形状精度の測定は真円度測定機(テラーホブソン製 TR300)により測定し、円弧補間加工の切削開始点を 0 度として輪郭形状を評価する。図 12 (a)は従来の制御法、(b)は提案する制御法による輪郭形状である。4 箇所象限突起が見られるが、PID 制御による

Fig.9 Comparison of deviations during air cutting

Fig.10 Parameters and deviation with various feed rates

Fig.11 Parameters and deviation with the amplitude of the input

Fig.12 (a) Contoured profile by conventional method (b) Contoured profile by proposed method

Fig.13 Profile of workpiece at quadrant motion

Fig.14 Comparison of parameters between air cutting and cutting

象限突起のピーク値の平均高さは $10.1\mu\text{m}$ 、提案する制御法によるそれは $5.7\mu\text{m}$ を示し 43.6%減少している。また、0度において大きな食い込みが発生しているのは、エンドミルが切削開始時に一時停止するため生じていると考えられる。図13に図12の輪郭軌跡の90度付近を拡大した輪郭形状を示す。ロストモーションはサーボモータのエンコーダには検出されないため、提案する制御法においても従来の制御法と同様に約 $2\mu\text{m}$ のロストモーションが見られる。ロストモーションを除いた象限突起のピーク値が、提案する制御法によって $9.9\mu\text{m}$ から $6.08\mu\text{m}$ に減少していることが確認できる。

5.2 空運転と加工中における動特性パラメータの相違

次に提案する制御に対する切削抵抗の影響を調べるため、空運転時のパラメータ a_1 と加工時のパラメータ a_1 との比較検討を行った。図14に切り込み深さ 0.1mm 、送り速度 202mm/min における象限突起部分を拡大したパラメータ a_1 を示す。上段は空運転中、下段は加工中である。象限突起以外では切削抵抗の影響により、パラメータは加工中において変動が大きく現れている。しかし象限突起部分でパラメータは、空運転時と加工時に同じ値を示す。これより切削抵抗の影響を受けずに、象限突起の補正を行なうことができる。

6. 結 言

本研究では2軸NCテーブルを用いた実時間逆伝達関数制御による軌跡制御実験および加工実験を行い、工作物の輪郭軌跡を評価することにより制御効果を検証し、以下の結論を得た。

- (1) 動作中の動特性パラメータ a_1 および a_2 を実時間において同定した。パラメータ a_1, a_2 は一定ではなく、動作中に変化し特に象限突起においてパラメータは特徴的な値を示した。
- (2) 時間領域における実時間でのパラメータ同定によって、テーブル位置によりパラメータが変化することが確認された。しかし周波数領域における伝達関数では、動特性パラメータの差異は明確に存在せず、実時間にお

けるパラメータ同定の重要性が確認された。

- (3) 実時間逆伝達関数制御によって象限突起部分における追従性が向上し、偏差のピーク値が約 37.1%減少した。
- (4) 加工した工作物の輪郭軌跡における象限突起は、提案した制御法により平均で約 43.6%減少した。これにより工作機械における円弧補間加工においても本手法が有効であることが確認された。
- (5) 空運転時と加工時において、同定した動特性パラメータに違いが見られなかったことから、切削抵抗の影響を受けずに象限突起の補正を行なうことができる。

参 考 文 献

- 1) 垣野義昭, 伊原之敏, 中津善夫, 篠原章翁: NC 工作機械の運動精度に関する研究(第6報), 精密工学会誌, **56**, 4, (1990) 739.
- 2) 藤田純, 羽山定治他: NC 工作機械の円弧象限切換時運動誤差の理論解析, 精密工学会誌, **67**, 1, (2001) 152.
- 3) Y. Suzuki, A. Matsubara, Y. Kakino and K. Tsutsui: A Stick Motion Compensation System with a Dynamic Model, JSME Int. J., Series C, **47**, 1, (2004) 168.
- 4) 羽山定治, 伊東正頼他: NC 工作機械送り駆動系における漸増形ロストモーションの生成機構とその補正に関する研究, 精密工学会誌, **62**, 2, (1996) 247.
- 5) 佐藤隆太, 堤正臣, 長島一男: 円運動象限切替え時における送り駆動系の動的挙動, 精密工学会誌, **72**, 2, (2006) 208.
- 6) 森本喜隆, 市田良夫他: 逆伝達関数制御法を用いたレーザ加工機の位置決め制御, 精密工学会誌, **67**, 4, (2001) 602.
- 7) 是田規之, 沖友啓成他: 修正逆伝達関数制御による工作機械の送りの高速化に関する研究, 精密工学会誌, **59**, 8, (1993) 1347.
- 8) 森本喜隆, 安井武司, 中条雅司: 実測逆伝達関数を用いた NC タレットパンチの動特性解析と高速位置決め, 精密工学会誌, **58**, 12, (1992) 2093.
- 9) 中尾陽一, 安田智宏, 浦田暎三: 回転形円筒工具を使用した CNC 自由曲面加工機の開発, 日本機械学会論文集(C 編), **62**, 12 (1996) 604.
- 10) M. Tomizuka: Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control, Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control, **109** (1987), 65-68.
- 11) T. C. Tsao, M. Tomizuka: Adaptive Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control, Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control, **109** (1987), 349-354.
- 12) 山崎敬則, 瀬戸将城, 堤正臣: 数値制御工作機械送り駆動系の摩擦補償器の設計, 精密工学会誌, **66**, 11, (2000) 1781.
- 13) 長島一男, 勝木雅秀他: NC 工作機械の象限切替え突起量の理論解析と入力適応系による補正, 日本機械学会論文集(C 編), **66**, 648, (2000) 2877.
- 14) 堤正臣, 大友誠司他: 摩擦を考慮した CNC 工作機械の送り駆動機構の数学モデル, 精密工学会誌, **61**, 10, (1995) 1458.
- 15) 鶴田和寛, 村上輝夫, 二見茂: 転がり案内における速度反転時の非線形摩擦挙動, 精密工学会誌, **69**, 12, (2003) 1759.
- 16) 田中淑晴, 大岩孝彰, 大塚二郎: 精密位置決め制御のためのリニアボールガイドの摩擦モデルに関する研究, 精密工学会誌, **72**, 4, (2006) 470.
- 17) 田中淑晴他: 精密位置決め制御のためのリニアボールガイドの摩擦モデルに関する研究(第2報), 精密工学会誌, **73**, 4, (2007) 465.
- 18) 岩崎誠, 松井信行他: ロストモーション補償による工作機械テーブル駆動系の高精度軌跡制御, IEEJ, Trans. IA, **125**, 6, (2005) 616.
- 19) 岩崎誠, 前田佳弘他: 非線形摩擦のモデル化と摩擦補償による位置決め制御系の高精度化, IEEJ, Trans. IA, **126**, 6, (2006) 732.