NC 工作機械の工具移動軌跡に生ずる誤差とその入力適応系*

長 島 一 男^{*1}, 広 瀬 敏 之^{*1}

Contouring Path Deviation in CNC Machine Tools and its Input-Adaptive System

Kazuo NAGASHIMA^{*2} and Toshiyuki HIROSE^{*2} Toshiba Machine Co., Ltd., Machine Tool Engineering Development Center,
2068-3, Oooka Numazu-shi, Shizuoka-ken, 410-8510 Japan

This paper reveals the cause of the machining error of free form the surface when providing the NC command by continuous short blocks. This paper proposes a method to decide a limit value of the distribution to realize the machining error within allowable tolerance, and also a method of acceleration and deceleration of the motion that machines faster as possible as under those limitations. The proposed methods can be installed not only into NC. equipment but also into personal computer that process CAM data out of NC., and are able to increase twice the productivity of existing machine tool by small additional costs.

Key Words: Machine Tools, Numerical Control, Servomechanism, Feeding Drive, Accuracy, Tool Path Compensation, Input-Adaptive System, Contouring Pass Deviation, Preview Control

1. 緒 言

金型加工に代表される自由曲面加工においては、工具の移動中の軌跡に誤差を生じないことが求められる。特に最近のように高精度化と同時に高能率化が要求されると、マシニングセンタでは送り運動の高精度化と高速化が重要な課題になる^{1)~3)}。

数値制御された送り駆動機構は、ボールネジの伸縮のような機械的な変形に加えてサーボ系の追従遅れが誤差の原因となる。これらの機械的な変形とサーボ系の追従遅れは、何れも加速度ベクトルの各軸方向成分に関係することから、許容範囲内の誤差とするためには、加速度ベクトルの大きさを一定値以内に制限することが必要である。特にコーナ部の加工ではこの点を考慮する必要がある。

ところでNCの移動指令は座標と送り速度を与えるので、指令の送り速度を厳守しつつ急に移動方向を変えると、機械はサーボ系の追従遅れ量だけコーナ部の手前から徐々に運動の方向を変えるため、指令のコーナ部において偏向角度と追従遅れ量とに関係する「だれ」を生ずる。この「だれ」を生じない対策として次の指令を先読みし、移動方向が一定角度以上に偏向する場合には、コーナ部に向けて自動的に減速し、コーナ部を通過した後

は自動的に加速して指令速度に復帰する制御が行われる。しかし自由曲面加工において指令のブロック長が短いとコーナ部の直前の指令ブロック内では減速が間に合わないという新たな問題が浮上する。

そこで本研究では、これらの問題に対して、ひとつの解決方法を提示するものである。この方法では、数百ブロックのNC指令を蓄積し、これらのブロックの指令位置関係から移動に伴う加速度が許容値を超えないように移動速度を自動的に制限することにより、移動軌跡の誤差を許容範囲内に限定できることに基づいている。そしてこの制御方法はNC装置の外部で行うことが可能であり、一世代前の演算速度の遅いNC装置を交換する必要もなく、自由曲面の加工能率を倍増することができる。

2. おもな記号

本文中に用いる記号は次のとおりである。

記号	単位	内 容
C_{ad}	-	加減速の許容時間率
C_f	-	円弧に対する分配量制限値の修正係数
D	mm	ドループ $[=T_p \cdot F]$
D_v	mm	予見補償されたドループ
ds	mm	移動距離 $[=\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}]$
dx, dy, dz	mm	各軸方向の移動距離
$F, F_{\max}$	mm/s	送り速度, 最高切削送り速度
K	kN/m	駆動系の剛性

* 原稿受付 1999年1月18日。

^{*1} 正員, 東芝機械(株) (〒410-8510 沼津市大岡 2068-3)。

E-mail: nagashima.kazuo@toshiba-machine.co.jp

K_f	-	コーナ部の分配量制限値の修正係数
L	mm	分配量(ΔT の間の移動量) $[= \Delta T \cdot F]$
L_a	mm	加速後の最終分配量の許容値
L_{amh}	mm	$L_{amh} \equiv L_a - \delta / 2$
L_d	mm	減速後の最終分配量の許容値
L_{dph}	mm	$L_{dph} \equiv L_d + \delta / 2$
L_{dc}, L_{dr}	mm	コーナ部, 円弧部における L_d
L_{de}	mm	精度確保に関する L_d
L_m	mm	前ブロック最終分配量
L_{max}	mm	加減速可能な最大分配量
L_{mph}	mm	$L_{mph} \equiv L_m + \delta / 2$
L_r	mm	L_d まで減速可能な初回分配量の許容値
L_{rph}	mm	$L_{rph} \equiv L_r + \delta / 2$
M	t	移動質量(工作物質量を含む)
n	-	分配回数(サンプリング数)
n_1, n_2, n_{ad}		加速, 減速, 加減速分配回数
r	mm	円弧半径
s	-	ラプラス演算子
S_r	mm	減速点までの残りのストローク
S_z	mm	ブロック終点までのストローク
T_{acc}	s	直線加減速時定数
T_p	s	位置ループ時定数 $[= 1 / \omega_0]$
T_{pv}	s	予見補償された位置ループ時定数
T_v	s	予見平均化時間
Δr	mm	半径減少量
Δr_{pv}	mm	位置ループの予見補償後半径減少量
Δr_v	mm	予見平均化による半径減少量
ΔT	s	サンプリング周期
α	mm/s ²	計画加速度 $[= F_{max} / T_{acc}]$
ε	mm	軌跡の誤差または許容誤差
ε_{pv}	mm	位置ループ制御軌跡の予見補償後誤差
ε_v	mm	予見平均化による軌跡の誤差
δ	mm	分配量の許容変化量 $[= \alpha \cdot (\Delta T)^2]$
θ	rad	偏向角度
ω_0	rad/s	位置ループゲイン
ω_1, ω_2	rad/s	予見補償第1, 第2コーナ周波数

3. 入力適応系の基本的な考え方

かつて適応(adaptive)ないし自己最適制御系(self-optimizing control system)は, 望ましい応答を得るために入力信号に対して修正を加える入力適応系(図1)と, 望ましいシステム性能を得るために制御係数を自動的に最適化する係数適応系(図2)に分類された⁴⁾. そして近年では後者, 中でもモデル規範形適応制御(model reference adaptive control)とセルフチューニングレギュレータ(self-tuning regulator)のみに限定して適応制御系を論じることが多い⁵⁾. しかし前者にも工業的には利用価値の高い

ものがあり, 本論文で適用した制御方法もその一例である. また適応制御の工作機械への応用は, その目的から次のように分類された⁴⁾.

- 切屑除去率を最大にする制御,
- 生産速度を最大にする制御,
- 加工コストを最小にする制御,
- 一定な切削速度の制御,
- 最適な主軸速度の選択,
- 加工寸法誤差を補償する制御,
- 表面仕上げ品位を最適にする制御,
- 振動を防止・除去する制御.

Fig.1. Input-adaptive control system (A. E. De Barr⁴⁾)

Fig.2. parameter-adaptive control system (A. E. De Barr⁴⁾)

本論で提案する制御は, これらのうちの a)~d) および f) g) に対して一定の効果を有する方法と考える. 適応制御の工作機械への適用の事例⁶⁾の多くは, 目的とする性能を満たすために送り速度を制御するものである. 送り速度は切削速度や切り込み量とともに, 切削性能を決定する主要なパラメータには相違ないが, サーボモータ制御系から見れば単なる目標値の一つに過ぎないことから, これらは, 入力適応系に分類すべきものである. 本論の制御は, 現実の制御出力に替え, 等価なモデルの出力により性能を評価するモデル規範形でもあり(図3), その結果として現実の制御に先行して適応系の処理を行うことができ, 現実の時間経過と逆順の処理も可能となる.

Fig.3. Model reference input-adaptive system

ボールエンドミル工具により, 工作物凹面に加工可能な最小曲率半径は工具半径であるが, 実際に工具半径に

等しい曲率半径の凹面の溝を横切って加工すると、図 4 の c に示すように曲率の中心において前後の接線方向が異なる工具経路の接続が発生する。すなわち、ここで工具の移動方向が急変する。以下この点を尖点と呼ぶ。

ところで、有限の送り速度 F の指令値が与えられ、それに忠実に移動させると次のような不都合が発生する。

- 忠実に経路を辿るためには尖点において無限大の加速度が必要である。
- 現実には有限の加速度しか具現できないため経路誤差を発生する。
- 切削点が急速に転移するために工具の 1 枚の切れ刃が除去すべき体積が激増し工具に大きな切削力負荷が発生する。
- 大きな切削力負荷により工具が弾性変形し、切り残しを発生する。
- その結果、仕上げ面品位が劣化したり、著しい場合は工具が折れたりする。

指令の時間微分を補償値として加えるフィードフォワード補償はこれらの不具合の多くに対して効果が期待できない。そこで、これらのことを考慮して、工具の移動方向の変化により生ずる工具軌跡の誤差を軽減する方法として、モデル規範形の特徴を含んだ入力適応制御方式をここで提案する。

4. 軌跡に生ずる誤差と許容分配量

4.1 円弧を回るときに生ずる誤差 円弧を創成する NC の指令では、移動軌跡に半径の減少が見られる。この半径減少は NC サーボの位置ループにおける定常速度偏差のドループ D が主たる原因である。垣野ら⁷⁾はスムージング回路が 1 次遅れ回路であると仮定して、サーボ機構の半径減少量が送り速度の 2 乗に比例することを示した。この考えは岩部ら⁸⁾によっても踏襲されている。しかしながら、多くの CNC 装置ではスムージングを移動平均により演算しているから、平均化時間の半径減少量に及ぼす効果は 1 次遅れ回路に比べて遥かに少ない。その一例として、予見制御・サーボ機構⁹⁾の等価ブロック線図を図 5 に示す(付録 1 参照)。予見補償部は 1 次進み補償回路で、第 1 コーナ周波数 ω_1 を位置ループゲイン ω_o に等しく選ぶことにより位置ループゲイン ω_o を第 2

コーナ周波数 ω_2 まで高めたことと等価の制御特性が得られる。しかしながら、モータ電流の飽和を防ぐための平滑部を必要とする。予見系は先行制御のため、現実系では許されない z の正のべき乗の演算が許される。このサーボ系において、平均化時間の半径減少量 Δr_v は図 6 に示すように次の (1) 式で求められる(付録 2 参照)。

$$\Delta r_v = \frac{1}{24 \cdot r} \cdot (T_v \cdot F)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 5. An equivalent block diagram of preview controlled feed system

また、サーボの位置ループ時定数は (2) 式のように、指令と機械との位置の差であるドループは (3) 式のようにそれぞれ予見補償により等価的に削減すると考える。

$$T_{pv} = \frac{1}{\omega_o} - \frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2} = \frac{\omega_1 - \omega_o}{\omega_o \cdot \omega_1} + \frac{1}{\omega_2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$D_v = T_{pv} \cdot F \quad \dots\dots\dots (3)$$

Fig. 6 An error arisen from smoothing process on circular path

Fig. 7. An error arisen from compensated servo process on circular path

これによる半径減少量 Δr_{pv} は図 7 により次の (4) 式で求められ、特に $D_v \ll r$ ならば (5) 式に簡略化できる。

$$\Delta r_{pv} = r - \sqrt{r^2 - D_v^2} = \frac{D_v^2}{r + \sqrt{r^2 - D_v^2}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta r_{pv} \cong \frac{1}{2 \cdot r} \cdot (T_{pv} \cdot F)^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

合計の半径減少量 Δr は (1) 式と (5) 式の和として (6) 式で求められる。すなわち、半径減少は送り速度の 2 乗に比例し 半径に反比例する。

$$\Delta r = \Delta r_v + \Delta r_{pv} = \frac{F^2}{2 \cdot r} \cdot \left(\frac{T_v^2}{12} + T_{pv}^2 \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

さらに、送りが高速になると慣性力 $(M/r) \cdot F^2$ による半径増加 $\{M/(K \cdot r)\} \cdot F^2$ も無視できなくなる。

円弧を短い直線部分 L に分割して指令する場合、理論的に生ずる経路誤差 ε は(7)式で与えられる(付録3参照)。この量はNC内部分配では問題にならないが、速度の遅い通信回線を介したシステムでは ΔT を長くせざるを得ないので式(7)に対する配慮が必要となる。

$$\varepsilon = \frac{L^2}{8 \cdot r} = \frac{(\Delta T \cdot F)^2}{8 \cdot r} \quad \dots\dots\dots (7)$$

これらの半径誤差以外に、象限切替え位置に発生する突起または食い込み現象の誤差が存在する¹⁾。この誤差も送り速度を下げると減ることが知られるが、その定量的因果関係が不明確なのでここでは論じない。

4.2 尖点を通過するとき生ずる誤差 NCの直線指令が尖点で移動方向を変えると、予見平均化による軌跡の最大の誤差 ε_v は図8に示すように求められる。図8の尖点に原点(0,0)を、前後の直線経路の二等分方向にx軸をとる局所座標系を考えても一般性を失わない。yの平均はゼロになるからxの平均のみを検討すれば良いので、誤差 ε_v は次の式で求められる。

$$\varepsilon_v = \frac{1}{2k+1} \cdot \sum_{i=-k}^k x_i = \frac{T_v \cdot F}{2k \cdot (2k+1)} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sum_{i=-k}^k |i| \quad \dots\dots\dots (8)$$

$\sum_{i=1}^k i = \frac{k}{2} \cdot (k+1)$ を用いて整理すると(9)式を得る。

$$\varepsilon_v = \frac{T_v \cdot F \cdot (k+1)}{2 \cdot (2k+1)} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $\Delta T \ll T_v$ の場合、 $\frac{k+1}{2k+1} \approx \frac{1}{2}$ と近似できるので(10)式を得る。

$$\varepsilon_v = \frac{T_v \cdot F}{4} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

Fig.8. An error arisen from smoothing process broken line path

Fig.9. An error arisen from compensated servo process broken line path

直線指令が尖点から移動方向を変えると、サーボ系にランプ応答の信号を重畳して与えることと等価になる。すなわちこの状況で起こり得る誤差はランプ応答として評価できる。尖点における時刻を $t=0$ とし、その前後の挙動を調べる。簡単のために尖点の (x,y) 座標を $(0,0)$ とし、図9に示すように $-y$ 方向から送り速度 F で進入し右に角度 θ 偏向するとする。尖点に至る指令位置および

機械位置は、それぞれ次のベクトルで表される。

$$\text{尖点に至る指令位置: } (0, F \cdot t) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{尖点に至る機械位置: } (0, F \cdot t - D_v) \quad \dots\dots\dots (12)$$

尖点を通過した後の指令位置は $(F \cdot t \cdot \sin \theta, F \cdot t \cdot \cos \theta)$ であるから、ランプ入力 $(F \cdot t \cdot \sin \theta, -F \cdot t \cdot (1 - \cos \theta))$ を尖点から従前の指令に加算して各軸に入力することに相当する。サーボ系の伝達関数を $G(s) = 1 / (T_{pv} \cdot s + 1)$ に近似すると前記ランプ入力の応答¹⁰⁾ は次のようになる。

$$x = F \cdot \left\{ t - T_{pv} \cdot \left(1 - e^{-t/T_{pv}} \right) \right\} \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$y = -F \cdot \left\{ t - T_{pv} \cdot \left(1 - e^{-t/T_{pv}} \right) \right\} \cdot (1 - \cos \theta) \quad \dots\dots\dots (14)$$

従前の機械位置(12)式に(14)式を加えるとY軸の機械位置は、

$$y = F \cdot t - D_v - F \cdot \left\{ t - T_{pv} \cdot \left(1 - e^{-t/T_{pv}} \right) \right\} \cdot (1 - \cos \theta) \quad \dots\dots (15)$$

図9から軌跡の誤差は $t = T_{pv}$ において最大になると推定すれば、このときの機械座標は次のようになる。

$$x = F \cdot T_{pv} \cdot e^{-1} \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$y = -F \cdot T_{pv} \cdot e^{-1} \cdot (1 - \cos \theta) \quad \dots\dots\dots (17)$$

NCサーボの位置ループにおけるドループによる経路誤差は(16), (17)より尖点と (x,y) との距離として次式で与えられる。

$$\varepsilon_{pv} = \sqrt{x^2 + y^2} = F \cdot T_{pv} \cdot \frac{2}{e} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (18)$$

実際の経路誤差は、予見平均化処理の結果がNCサーボの位置ループの入力になるのでこれよりも小さいが、軌跡の許容誤差 ε を次のように(10)式と(16)式との合計とすれば安全側である。

$$\varepsilon = \varepsilon_v + \varepsilon_{pv} = F \cdot \left(\frac{T_v}{4} + \frac{2 \cdot T_{pv}}{e} \right) \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (19)$$

すなわち、経路誤差は送り速度に比例する。

4.3 分配量の制限値 これまでに示した経路誤差は何れも送り速度 F またはその2乗に比例することから、送り速度 F を制限することにより許容誤差の範囲内に制御することが可能である。NCの位置制御はサンプリング周期 ΔT ごとに行われるから、 ΔT に対する分配量 L を(20)式の値に制限すれば送り速度を F に制限したと等価である。

$$L = \Delta T \cdot F \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここでは、工具移動軌跡誤差が許容値におさまるように、次の5つの制限値を考慮する。

a) 加速可能な速度制限値: L_a

図 10 より加速状態における分配回数 n は(21)式で表される. また, 移動距離 ds は図 10 の階段部の面積であるが, これは台形部の面積に等しいことから,

$$L_{mph} = L_m + \delta/2 \text{ を用いると (22) 式で表される.} \quad (21)$$

$$ds = \frac{n}{2} \cdot \left(L_{mph} + L_a + \frac{\delta}{2} \right) \quad (22)$$

(21) 式を (22) 式に代入し因数分解すると (23) 式を得る. これを加速可能な速度制限値 L_a について解くと (24) 式を得る.

$$ds = \frac{1}{2\delta} \cdot \left\{ \left(L_a + \frac{\delta}{2} \right)^2 - L_{mph}^2 \right\} \quad (23)$$

$$L_a = \sqrt{L_{mph}^2 + 2 \cdot \delta \cdot ds} - \frac{\delta}{2} \quad (24)$$

b) 円弧半径による制限値: L_{dr}

(6) 式に $F = L / (\Delta T)$ を代入し L について解くと円弧半径に対応した制限値 L_{dr} を定められる.

$$L_{dr} = \sqrt{C_f \cdot \delta \cdot r} \quad (25)$$

ここに $C_f = (2 \cdot \varepsilon / \alpha) / (T_{pv}^2 + T_v^2 / 12)$ である.

c) 偏向の偏差に対する制限値: L_{dc}

(19) 式に $F = L / (\Delta T)$ を代入し L について解くと偏向の偏差に対する制限値 L_{dc} を定められる.

$$L_{dc} = \frac{\varepsilon \cdot K_f}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (26)$$

ここに $K_f = 4 \cdot e \cdot \Delta T / (e \cdot T_v + 8 \cdot T_{pv})$ である.

d) 精度確保に関する制限値: L_{de}

(7) 式を L について解くと精度確保に関する制限値 L_{de} を定められる.

$$L_{de} = \sqrt{8 \cdot \varepsilon \cdot r} \quad (27)$$

e) 減速可能な速度制限値: L_r

図 11 より減速過程における分配回数 n は次の (28) 式で表される. 減速距離 S_r は図 11 の階段部の面積であるが, これは台形部の面積に等しいから (29) 式で表される.

Fig.10 Upper limit of distribution caused from acceleration stroke

Fig.11 Upper limit of distribution caused from deceleration stroke

$$n = \frac{L_r - L_d}{\delta} + 1 \quad (28)$$

$$S_r = \frac{n}{2} \cdot (L_r + L_d) \quad (29)$$

(28) 式を (29) 式に代入して整理し, 減速可能な速度制限値が L_r について解くと (31) 式が得られる.

$$S_r = \frac{1}{2\delta} \cdot (L_{rph}^2 - L_{dph}^2) + L_d \quad (30)$$

$$L_r = \sqrt{L_{dph}^2 + 2 \cdot \delta \cdot (S_r - L_d)} - \frac{\delta}{2} \quad (31)$$

これらの制限値の内, a) c) e) は指令ブロックの境界に関する制限値であり, b) と d) は指令ブロック内部の制限値である. L_{dr} , L_{dc} , L_{de} などの制限値の中で最小値を選ぶことにより, 形状精度・表面あらさを許容範囲内に抑えることができる. ただし, 単一の順方向の処理だけでは減速ストローク S_r が未定であるために最後の e) は求めることができないので, 蓄積した指令データを逆順に処理して S_r を求めてから L_r を決定する. さらに, 指令ブロックの両側の境界に関する制限値が指令ブロック内部の制限値を上回る場合は, その制限値は指令ブロック内部の制限値まで引き下げる.

5. 制限条件を満たす加減速

5.1 加減速を実施する条件 前節で求めた制限値に分配量を制限すれば経路誤差は許容範囲内に限定できるが, むやみに加減速を繰り返すことを避けるために加減速を実施する条件を決めている.

最短の時間で移動するために加速後直ちに減速をする場合に到達可能な最大分配量 L_{max} を求める. 図 12 より加速分配回数 n_1 は (32) 式で, 減速分配回数 n_2 は (33) 式で表される.

$$n_1 = \frac{L_{max} - L_m}{\delta} \quad (32)$$

$$n_2 = \frac{L_{max} - L_a}{\delta} \quad (33)$$

また, 移動距離 ds は図 12 の階段部の面積であるが, これは台形部の面積に等しいから (34) 式で表される.

$$S_z = \frac{n_1}{2} \cdot (L_m + L_{max} + \delta) + \frac{n_2}{2} \cdot (L_{max} + L_a - \delta) \quad (34)$$

Fig.12 Upper limit of distribution caused from acceleration and deceleration stroke

$$S_z = \frac{n_1}{2} \cdot (L_m + L_{\max} + \delta) + \frac{n_2}{2} \cdot (L_{\max} + L_a - \delta) \quad (34)$$

(32) 式と (33) 式を (34) 式に代入し, $L_{amh} = L_a - \delta/2$ を用いて整頓する.

$$S_z = \frac{1}{\delta} \cdot \left(L_{\max}^2 - \frac{L_{mph}^2 + L_{amh}^2}{2} \right) + \frac{\delta}{4} \quad (35)$$

これを最大分配量 $L_{\max}$ について解いて (36) 式を得る.

$$L_{\max} = \sqrt{\delta \cdot \left(S_z - \frac{\delta}{4} \right) + \frac{L_{mph}^2 + L_{amh}^2}{2}} \quad (36)$$

$\delta \ll 4S_z$ の場合, $\delta/4$ を省略し (37) 式を得る.

$$L_{\max} = \sqrt{\delta \cdot S_z + \frac{L_{mph}^2 + L_{amh}^2}{2}} \quad (37)$$

必要な分配回数は次の式で与えられる.

$$n_{ad} = \frac{2 \cdot S_z}{L_m + 2 \cdot L_{\max} + L_a} \quad (38)$$

加減速をしない場合の分配回数は次の式で与えられる.

$$n = \frac{2 \cdot S_z}{L_m + L_a} \quad (39)$$

ここで $(n_{ad} < C_{ad} \cdot n)$ が成立すれば加速減速を実施する.

5.2 データ処理プログラム 前節までに求めた分配量の制限値に従って必要に応じて加減速を行えば, 許容誤差の範囲内に経路誤差を抑えることができるので, 図13にフローチャートを示すプログラムを開発した.

本提案を適用したパソコンシステムでは, NC指令プログラムは工場全体を統括する中央計算機に保管されていて機械位置からの作業者の呼びに応じて本システムにダウンロードされる. 本システムは受信した指令をブロックごとに解釈し, 移動先の位置と移動量と偏向角度または円弧の中心と半径・その他の情報に分類してメモリに蓄積する. その際に極端に移動量が小さい指令が含ま

れると以降の処理の障害になるので, その前または後のブロックにつなぎ込む. 貯えた指令の最後に停止点を仮定し, そこから逆順に指令を走査して減速可能な分配量を決定する. 仮停止点に停止するための分配量の制限値よりも小さな制限値が発生すれば仮の減速区間は終了する. 逆順の処理が完了すればすべての指令に分配量の制限値が添付されているからこの制限値にしたがって加減速の指令を行う. 加減速された指令は, 通信回線を経由してNCに指令される.

5.3 加工の結果と適用事例 図14は, 本提案の有効性を実証するための試験結果の一例で, アルミニウム材を $\phi 6$ のボールエンドミルで加工した試験片を示している. その中に(A)で示す部分の表面の拡大図を図15に示し, 一往復に要する時間と概略の面あらしさを併記している. 図の中央は送り速度800mm/minの指令で加工した形状を示しており, 通常のNC加工により送り速度をF2000と速くして加工すると右のように食い込みを生ずる. しかし本研究の制御で加工すると左のように滑らかな面が得られ, F2000の指令でもF800の加工と比較して, 仕上げ面のあらしが向上し, 加工時間が短縮している. ここで, 本研究の制御により得られた成果の更なる事例は次のとおりである.

【事例1】 門型マシニングセンタに本研究を適用した最初の事例では, F1500以上では食い込みが著しくF1400程度でしか加工できなかった金型加工が本研究の適用によりF4000で加工可能になり生産性を倍増させ, 金型加工には本システムが不可欠であることを証明した.

【事例2】 次に門型マシニングセンタに本研究を適用した事例では, 指令された点の間をスプライン補間する点を本処理の際に追加発生させて, それまでは10mmのブロック長でも多角形状に加工されていた金型表面を30mmのブロック長の指令でも, スプライン補間機能を

Fig.13. Flowchart of input adaptive system

Fig.15 Comparison between finishing surface by conventional method and that produced by proposed method

Fig.16 An error arisen from fitting with broken line to circular path

持たないNCで滑らかに加工することが可能になった。

【事例3】 立形マシニングセンタに本研究を適用した事例では、中央計算機のNCデータは光ケーブルを経由して本システムにダウンロードされる。また、本処理の際にNCの相違によるGコードの違いを整合させるコード変換を併せて行い、中央計算機の中のNCデータ管理を容易にしている。本処理の結果はバイナリ指令としてNCに指令される。通信速度19200bpsにおいて文字列指令では1指令当たり12msの時間を要するが、バイナリ指令にすれば同じ通信速度で1指令当たり6msで通信可能であり、加減速処理のサンプリング時間 ΔT を短縮できる。 ΔT が短くなると δ が小さくなり、同じ加減速時定数でもきめ細かな加減速を行い、形状精度および仕上げ面あらかの向上が可能である。

【事例4】 本研究の原理をCNC装置の内部に組み込んだ数多くの事例では、サンプリング時間 ΔT は3msまで短くでき、さらに綺麗な仕上げ加工面を得ることができる。

6. 結 言

NCの指令データを解析して移動方向の偏向角度を求め、この偏向角度に応じて分配量制限値を設定し、かつ移動量との関係で減速可能な分配量制限値を設定し、これらの分配量制限値を満たすように必要に応じて加減速を行って指令を分配することにより、NC工作機械の移動軌跡が指令値から許容誤差範囲内を通過させることができる。

このことにより指令のFコードは高く設定できるので、綺麗な仕上げ面を短時間に加工することが可能になると期待され、実際に門型マシニングセンタおよび立形マシニングセンタに本提案を適用してその有効性を明らかにした。なお、本研究はNC指令に内在する不合理性を改善するもので、工作機械とサーボ系に内在する誤差を補償するものではないから、高精度化に向けては別途対策が必要であることを特に付記する。

本稿をまとめるに当たり東京工業大学工学部斎藤義夫教授ならびに伊東誼教授にご指導頂いたことを記し、厚く御礼申し上げます。

付録1 移動平均の伝達関数

予見平均時間を $T_v = 2k \cdot \Delta T$ と置く。両端を含み $(2k+1)$ 個のデータの平均値の伝達関数は次の式で表される。

$$\frac{z^k + z^{k-1} + \dots + z^0 + \dots + z^{-k}}{2k+1} \dots\dots\dots (40)$$

分母に $(z-1)$ を掛けて整理すれば図5中央の式を得る。

付録2 移動平均の半径減少量

指令の円弧上に原点を、円弧の中心方向にx軸をとる局所座標系で考えても一般性を失わない。yの平均はゼロになるからxの平均のみを検討する。

$$\Delta r_v = \frac{1}{2k+1} \cdot \sum_{i=-k}^k x_i = \frac{r}{2k+1} \cdot \sum_{i=-k}^k \left\{ 1 - \cos\left(\frac{i \cdot L}{r}\right) \right\} \dots\dots\dots (41)$$

cosを級数に展開し項ごとに総和を求める。

$$\Delta r_v = \frac{r}{2k+1} \cdot \left\{ \frac{L^2}{2r^2} \cdot \sum_{i=-k}^k i^2 - \frac{L^4}{24r^4} \cdot \sum_{i=-k}^k i^4 + \dots \right\} \dots\dots\dots (42)$$

4次項以上を省略し $\sum_{i=1}^k i^2 = \frac{k}{6} \cdot (k+1) \cdot (2k+1)$ と(18)式と

$T_v = 2k \cdot \Delta T$ とを用いて整理すると次式を得る。

$$\Delta r_v = \frac{1}{24 \cdot r} \cdot T_v \cdot (T_v + \Delta T) \cdot F^2 \dots\dots\dots (43)$$

$\Delta T \ll T_v$ の場合、 ΔT を省略し(1)式を得る。

付録3 円弧の直線分割経路誤差

図16の直角三角形にピタゴラスの定理を適用する。

$$r^2 = (r - \varepsilon)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 \dots\dots\dots (44)$$

これを ε について解いて(45)式を得る。さらに $L \ll 2r$ の場合、分母の L を省略し(7)式を得る。

$$\varepsilon = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} = \frac{L^2}{4r + 2\sqrt{4r^2 - L^2}} \dots\dots\dots (45)$$

参 考 文 献

- 1) 堤正臣・大友誠司・岡崎裕一・酒井浩二・山崎和雄・葛東方：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)，1458-1462。
- 2) 岩部洋育・嶽岡悦雄・宮口孝司・賀井治久：高速ミーリングの現状と今後，精密工学会誌，64-6(1998)，808-812。
- 3) 福井雅彦・玉井秀樹・高橋百利：三次元金型用高速・高能率切削加工，精密工学会誌，64-6(1998)，819-824。
- 4) A. E. De Barr: Adaptive control of machine tools, Machine Tool Research, Vol. VI, No.4, October, (1967), 91-99。
- 5) 新誠一：適応制御とその周辺，計測と制御，32-12(1993)，975-980。
- 6) H. Tipton: A review of application of adaptive control to machine tools, M. T. I. R. A., One-day Conference on Adaptive Control of Machine Tools, Paper 1, (29th, April 1970)
- 7) 垣野義昭・井原之敏・中津善夫・米谷光雄・手嶋健夫：NC工作機械の運動精度に関する研究(第4報，円弧補間時の半径減少のNC補正)，精密工学会誌，54-6(1988)，1113-1118。
- 8) 岩部洋育・竹本和博・今井純一：エンドミルによる高速度加工に関する研究(輪郭加工による加工精度と誤差要因)，機論，63-612C(1997-8)，1592-2885
- 9) 伊藤浩司，土谷武士：面積表加工を含む予見制御系の経路制御への応用，計測自動制御学会論文集，25-7(1989)，771-778。
- 10) 金子敏夫：機械制御工学，(1988)，62，日刊工業新聞社