

# エンドミル加工システムにおける切削力一定制御

藤本 真作\*・石井 一成\*\*・逢坂 一正\*

\* 岡山理科大学工学部福祉システム工学科

\*\* 株式会社牧野フライス製作所

(2001年11月1日 受理)

## 1. 緒言

近年の生産技術の発展に伴い、生産における高能率化、知能化が要求されている。特に工作機械加工において加工時間の短縮、加工精度の向上などが重要視されている。これらを実現するためには、工作機械の高剛性化、高精度化により工具や工作機械本体の変形を抑え、主軸・送りモータを高速化することが有効であるが、工作機械本体の重量や価格に影響するため容易ではない。そこで加工状態を計測し、その計測データに基づき制御を行う。すなわち、機械加工における制御的な面からの考察が必要となってくる。加工工程において実時間で制御しようとするれば各種センサ、アクチュエータを備え、コンピュータで制御されるような工作機械が必要となる。切削力、切削熱による影響や、加工によって発生する異常振動に対応可能な制御システムの構築が重要である。これまで工作機械の制御法についてさまざまな研究がなされているが、具体的な制御系設計法について述べられているものは少ない<sup>(1)(2)</sup>。

本研究では、フライス盤での加工時に切削動力計で切削力を計測し、そのデータを基に切削力一定制御を行うことを目的とする。ここで切削力一定制御とは、ある切込み深さの変化に対して曲げ切削力を一定にする制御のみを意味している。そこでエンドミル加工システムにおいて同定実験により加工モデルを構築し、その妥当性を検証するため切削力一定制御を行う。切削力一定で加工を行うことで、加工精度の向上、高能率化などの効果が見込める。制御にはPID制御とモデル規範型適応制御(MRAC: Model Reference Adaptive Controlの略)を用い、制御性能の比較を行う。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2章でエンドミルに作用する切削力について述べる。3章でエンドミル加工の加工モデルを構築し、4章でパラメータ同定を行う。5章では4章で求めた加工モデルをもとに切削力一定制御のシミュレーションおよび切削実験を行う。最後に6章で本論文の結論を述べる。

## 2. エンドミルに作用する切削力

現在の工作機械は、被削材や加工内容に応じて位置や速度の指令値をNC装置に設定して、その指令値に従いモータを制御しているものが多い。しかしこれらの指令値はこれまでの経験をもとに、工具が破損しないように試行錯誤的に決定される場合が多い。切削力が過大になった場合でも工具が折損しないように安全係数を見積もり送り速度が小さく設定されているため、加工能率の低下をきたしている。また、加工能率を上げるために送り速度を大きくすると切削力が過大になり、加工精度が悪化する可能性がある。

本研究では主軸回転数を一定とし、送り速度を制御することにより切込み量の変化に対して切削力を一定に保ち、力変形を抑制することにした。また切削時においてエンドミルに作用する力はFig.1に示すように切削トルク $T$ 、垂直分力 $W_1$ 、送り分力 $W_2$ 、背分力 $W_3$ であり、切削力 $F$ は垂直分力 $W_1$ 、送り分力 $W_2$ 、背分力 $W_3$ の合力として求められる。

$$F = \sqrt{W_1^2 + W_2^2 + W_3^2} \quad (1)$$

本論文では切削面を平面切削のみに限定しているため、垂直分力 $W_1$ を考慮せず、送り分力 $W_2$ と背分力 $W_3$ の合力として求められる曲げ切削力を切削力 $F$ としている。また、曲げ切削力はエンドミルの折損

に直接関係しており、過大な切削条件では強さ不足による単純な折損を生じる。したがってエンドミル加工時に重要な影響を与えることより、曲げ切削力をエンドミル加工時の切削力  $F$  としてさしつかえない。次に、切削時の各種パラメータについて Fig.2 に示す。送り速度と切削力の関係は次のようになる。

まず、1刃当りの送り  $f[mm/tooth]$  は、

$$f = \frac{v}{nZ} \tag{2}$$

となり、送り速度  $v[mm/sec]$  に比例している。平均切削面積の厚さ  $h[mm]$  は、

$$h = f \frac{360B}{\phi_s \pi D} \tag{3}$$

となる。したがって切削面積は  $S[mm^2]$  は、

$$S = ah \tag{4}$$

となる。ただし  $a$  は切込み量  $[mm]$  である。したがって切削力は次のように考えて差し支えない。

$$F = K_s S \tag{5}$$

となる。ただし  $K_s$  は比切削抵抗  $[N/mm^2]$  と呼ばれ、単位面積当たりの切削抵抗である。ここで (2) 式より (5) 式は、

$$F = K_s a f \frac{360}{\phi_s} \frac{B}{\pi D} = K_s a \frac{v}{nZ} \frac{360}{\phi_s} \frac{B}{\pi D} \tag{6}$$

となる。したがって送り速度と切削力は比例関係であることがわかる (3)。ここで、各パラメータについては Table 1 に示す。また、具体的な数値に関しては 5.3 節の Table 2 に示している。

Table 1 Cutting Parameters

End Mill Diameter	$D[mm]$
Number of Tooth	$Z$
Feed Rate	$v[mm/sec]$
Width of Cut	$B[mm]$
Swept Angle	$\phi_s[deg]$
Underformed Chip Section	$S[mm^2]$
Depth of Cut	$a[mm]$
Spindle Speed	$n[r.p.s]$

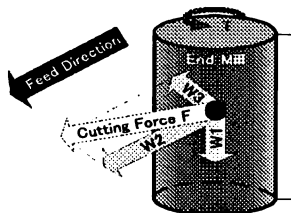


Fig.1 Cutting Force of End Milling

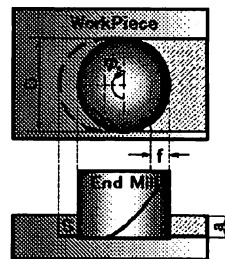


Fig.2 Cutting Parameters

### 3. エンドミル加工システム

切削力一定制御を行うために、エンドミル加工システムの加工モデルを構築し、その伝達関数を導出する。

3.1 加工システムの構成

Fig.3 にエンドミル加工システムの構成を示す。システムはフライス盤 (株式会社 HOSEI 製), 切削動力計 (佐藤工機製: 歪ゲージ式) から構成され, DC モータにより駆動される送り機構を有する。切削手順は次の通りである。コンピュータにより I/O ボード・PWM 信号発生回路を介して DC モータへ送り速度指令が送られテーブルが駆動されることにより工作機械が切削を行う。切削により発生する切削力は切削動力計・A/D ボードを, 工具の位置はエンコーダ・カウンタボードを介して再びコンピュータに取り込まれる。サンプリング周期  $T_s$  は 0.02[sec] である。

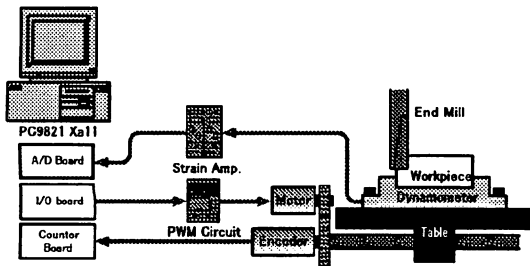


Fig.3 End Milling System

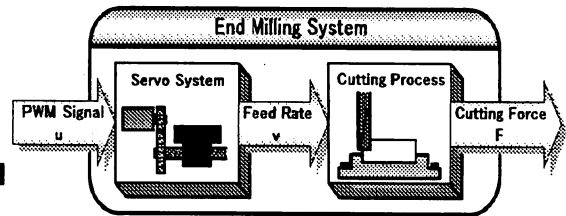


Fig.4 Block Diagram of End Milling System

3.2 加工モデル

エンドミル加工システムのモデルは, DC モータで駆動されるサーボシステムと工具により切削を行う切削プロセスに分割して求め, これらの伝達関数の結合により求めることができる。Fig.4 にエンドミル加工システムのブロック線図を示す。サーボシステムの伝達関数  $G_m(s)$  は入力を送り速度指令値  $u$ , 出力を送り速度  $v$  とすると, まず, 入力である PWM 信号  $u(t)$  と電流  $i(t)$  の関係は,

$$u(t) = \frac{1}{k_{PWM}} i(t) \tag{7}$$

である。ここで  $k_{PWM}$  は PWM 信号発生回路のゲインである。

またモータトルク  $\tau_m[Nm]$  と電流との関係は,

$$\tau_m(t) = k_t i(t) \tag{8}$$

となり, モータトルクと角速度との関係は,

$$\tau_m(t) = J \frac{d}{dt} \omega(t) + B_R \omega(t) \tag{9}$$

となる。ここで  $J$  は慣性モーメント (モータの慣性モーメントとテーブルの慣性モーメントの和),  $B_R$  は摩擦力である。

(7) 式, (8) 式, (9) 式をそれぞれラプラス変換すると,

$$u(s) = \frac{1}{k_{PWM}} I(s) \tag{10}$$

$$T_m(s) = k_t I(s) \tag{11}$$

$$T_m(s) = Js\omega(s) + B_R\omega(s) \tag{12}$$

となる。(11) 式, (12) 式より,

$$I(s) = \frac{(Js + B_R)}{k_t} \omega(s) \tag{13}$$

(10) 式, (13) 式より,  $u(s)$  と  $\omega(s)$  の関係をまとめると,

$$\omega(s) = \frac{k_t k_{PWM}}{Js + B_R} u(s) \quad (14)$$

となる。

したがって, サーボシステムの伝達関数  $G_m(s)$  は,

$$G_m(s) = \frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{b_m}{s + a_m} \quad a_m = \frac{B_R}{J} \quad b_m = \frac{k_t k_{PWM}}{J} \quad (15)$$

で表すことができる。

また切削プロセスの伝達関数  $G_c(s)$  は, 入力を送り速度  $v$  で, 出力が切削力  $F$  である。伝達関数を求めるには工作機械本体の動特性を考慮しなければならないが, 厳密な切削プロセスの伝達関数を求めることは困難である。そこで切削プロセスの伝達関数を 1 次遅れ系の伝達関数とし, (6) 式より送り速度と切削力との関係がほぼ比例関係にあることを考慮すると, 次式のようになる。

$$G_c(s) = \frac{F(s)}{v(s)} = \frac{b_c}{s + a_c} \quad a_c = \frac{1}{\tau_s} \quad b_c = K_s a \frac{360B}{nZ\phi_s \pi D\tau_s} \quad (16)$$

ここで  $\tau_s$ ; 時定数である。したがって, 加工モデルの伝達関数は

$$G(s) = G_m(s)G_c(s) = \frac{F(s)}{u(s)} = \frac{b}{s^2 + a_1s + a_0} \quad a_1 = a_m + a_c \quad a_0 = a_m a_c \quad b = b_m b_c \quad (17)$$

のように 2 次遅れ系の伝達関数で表すことができる。(17) 式の未知パラメータである  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b$  については, 次章のパラメータ同定実験により求める。

## 4. システム同定

### 4.1 最小二乗法によるパラメータ同定法

前章で構築された加工モデル [(17) 式] を零次ホールドの  $Z$  変換により離散化する。

$$\begin{aligned} G(z) &= \frac{F(z)}{u(z)} = \frac{z-1}{z} Z\left[\frac{G(s)}{s}\right] \\ &= \frac{\beta_1 z + \beta_0}{z^2 + \alpha_1 z + \alpha_0} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで各係数は,

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -(e^{-AT_s} + e^{-BT_s}) & \alpha_0 &= e^{-(A+B)T_s} \\ \beta_1 &= \frac{C}{A}(1 - e^{-AT_s}) + \frac{D}{B}(1 - e^{-BT_s}) \\ \beta_0 &= -\frac{C}{A}(1 - e^{-AT_s})e^{-BT_s} - \frac{D}{B}(1 - e^{-BT_s})e^{-AT_s} \\ A &= \frac{a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_0}}{2} & B &= \frac{a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_0}}{2} \\ C &= b\sqrt{a_1^2 - 4a_0} & D &= -b\sqrt{a_1^2 - 4a_0} \end{aligned}$$

である。また,  $T_s$  はサンプリング周期である。

(18) 式を差分方程式表現すると,

$$\begin{aligned} F(k) &= -\alpha_1 F(k-1) - \alpha_0 F(k-2) + \beta_1 u(k-1) + \beta_0 u(k-2) \\ &= \Theta^T \Phi(k) \end{aligned} \quad (19)$$

となる。ここで、

$$\Theta^T = [\alpha_1 \ \alpha_0 \ \beta_1 \ \beta_0] \tag{20}$$

$$\Phi(k) = [-F(k-1) \ -F(k-2) \ u(k-1) \ u(k-2)]^T \tag{21}$$

である。誤差  $\xi$  は、

$$\xi(k) = F(k) - \Theta^T \Phi(k) \tag{22}$$

で与えられるのでこの誤差の二乗が最小になるようにパラメータ  $\Theta$  を求める。すなわち、

$$J_N(\Theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi^2(k, \Theta) \tag{23}$$

を最小にする  $J_N$  を求めてやればよい。ただし、システムの入力信号  $F(k)$ 、入力信号  $u(k)$  にはサンプリング周期を  $T_s$  としたとき、それぞれ次式で与えられる離散時間信号である。

$$F(k) = F(kT_s) \quad u(k) = u(kT_s) \quad k = 0, 1, 2 \dots \tag{24}$$

また差分方程式表現には次式で定義されるシフトオペレータ (shift operator)  $y^{-1}$  を用いている。

$$y^{-1}u(k) = u(k-1) \tag{25}$$

#### 4.2 パラメータ同定実験

同定実験の方法は切削中に送り速度をステップ状に変化させ、そのときの入出力データから最小二乗法により未知パラメータを求める<sup>(4)</sup>。実験に用いた被削材はアルミニウム (A5052)、工具は2枚刃のエンドミルで工具径は6[mm]、工具材質は高速度工具鋼、主軸回転数は15[rps]、切込み深さは1[mm]とした。またエンドミルによる切削は刃物の構造上、断続切削であることや切削動力計のセンサ特性などを考慮して、ローパスフィルタを介することにより切削力を平滑化している。最小二乗法によるパラメータ同定により得られたモデルは(26)式である。Fig.5に同定結果を重ねて示すとほぼよく同定できていることがわかる。

$$G(s) = \frac{F(s)}{u(s)} = \frac{6037.7}{s^2 + 160.2s + 438.8} \tag{26}$$

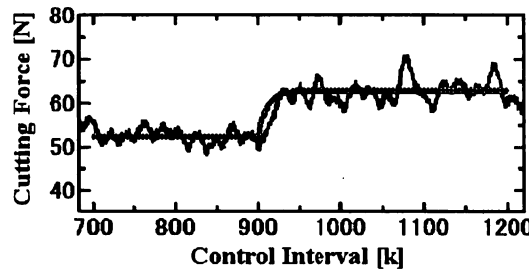


Fig.5 Identification Result

### 5. 切削力一定制御

切削力一定制御には、PID 制御とモデル規範型適応制御 (MRAC)<sup>(5)</sup> を用いる。

#### 5.1 PID 制御

これまで求めた加工モデルよりシステム全体を安定にするコントローラ、すなわち PID ゲインを設計する。ゲインの選定には Ziegler-Nichols の限界感度法<sup>(6)</sup> をもとに求める。安定限界のゲイン  $K_c$  とこのときの持続振動の周期  $T_c$  は、

$$K_c = 52.9405 \quad T_c = 0.02398 \tag{27}$$

となる。したがって Ziegler-Nichols の限界感度法をもとに得られた PID ゲインは、比例ゲイン  $K_P = 31.8$ 、積分ゲイン  $T_I = 1.2 \times 10^{-2}$ 、微分ゲイン  $T_D = 3.0 \times 3.0 \times 10^{-3}$  となる。PID 制御法による切削力一定制御はこの PID ゲインを用いて行うこととする。Fig.6 に PID 制御系のブロック線図を示す。

### 5.2 モデル規範型適応制御 (MRAC)

MRAC の特長は制御系設計者が定める "規範モデル" の出力にシステムが追従するように制御系を設計するものである。これは制御系にかせられる種々の設計仕様 (立ち上がり時間やオーバーシュート量など) を規範モデルという理想的なモデルを指定することによって表すということである。すなわちシステムの出力と規範モデルの出力の誤差  $e(k)$  を

$$\lim_{k \rightarrow \infty} e(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} (\mathbf{x}(k) - \mathbf{z}(k)) = 0 \quad (28)$$

となるように制御系を設計する。制御対象のモデルを  $\langle M_L \rangle$ 、規範モデル  $\langle R \rangle$  とし以下に状態変数表現で考える。ここで  $\mathbf{A}_m$  は安定行列である。

$$\langle M_L \rangle \quad \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k) \quad (29)$$

$$\langle R \rangle \quad \mathbf{z}(k+1) = \mathbf{A}_m\mathbf{z}(k) + \mathbf{B}_m r(k) \quad (30)$$

(28) 式に注意して入力を求めると次式が得られる。

$$u(k+1) = \sum_{i=1}^k \mathbf{F}_1(k)\mathbf{x}(k) + \sum_{i=1}^k \mathbf{F}_2(k)r(k) \quad (31)$$

$$\mathbf{F}_1(k) = -\mu \mathbf{B}_m^T \mathbf{P} e(k) \mathbf{x}(k)^T \quad \mathbf{F}_2(k) = -\mu \mathbf{B}_m^T \mathbf{P} e(k) r(k)^T \quad (32)$$

ここで、 $\mu$  は正のスカラー定数、 $\mathbf{P}$  は、 $\mathbf{Q}$  を正定行列としたときのリアプノフ方程式

$$\mathbf{P}\mathbf{A}_m + \mathbf{A}_m^T \mathbf{P} = -\mathbf{Q} \quad (33)$$

の唯一解である。本研究では  $\mathbf{Q}$  を単位行列として  $\mathbf{P}$  を求めた。システム同定により求められた線形モデルを (34) 式に示す。また MRAC の規範モデル  $\langle R \rangle$  は設計者の仕様を満たすように決定すればよいので、(35) 式のように決定した。 $\mu$  は後述するシミュレーションにより試行錯誤的に決定し、18 とした。Fig.7 にモデル規範型適応制御系のブロック線図を示す。

$$\langle M_L \rangle \quad \mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} 0.0267 & -2.5621 \\ 0.0058 & 0.9621 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} 0.0058 \\ 0.0001 \end{bmatrix} u(k) \quad (34)$$

$$\langle R \rangle \quad \mathbf{z}(k+1) = \begin{bmatrix} 0.7326 & -0.8611 \\ 0.0172 & 0.9999 \end{bmatrix} \mathbf{z}(k) + \begin{bmatrix} 0.0172 \\ 0.0002 \end{bmatrix} r(k) \quad (35)$$

### 5.3 シミュレーション

求めた各ゲインパラメータをそのまま実装することはシステムを破損してしまう恐れがあるため、まずシミュレーションによりゲインパラメータの妥当性を検討する。エンドミル加工システムの各パラメータについては Table 2 に示す。Fig.9 にシミュレーション結果の一例を示す。目標値、すなわち目標とする切削力は  $60[N]$  とする。サンプリング周期は  $0.02[sec]$  である。PID 制御のゲインパラメータは設計により求めた、 $K_P = 31.8$ 、 $T_D = 3.0 \times 10^{-3}$ 、 $T_I = 1.2 \times 10^{-2}$  をもとに調整を行い、オーバーシュートや振動を減少させるように  $K_P = 25$ 、 $T_D = 5.0 \times 10^{-3}$ 、 $T_I = 3.0 \times 10^{-2}$  とした。今後はこの PID ゲインパラメータを用いて制御を行うこととする。また MRAC の規範モデルは (35) 式を用い、 $\mu = 18$  としている。MRAC は規範モデルによく追従していることがわかる。PID は少しオーバーシュートがあるものの収束時間  $1.7[sec]$  は MRAC のそれとほぼ同じである。

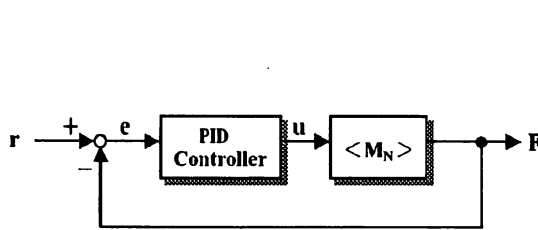


Fig.6 Blockdiagram of PID Control System

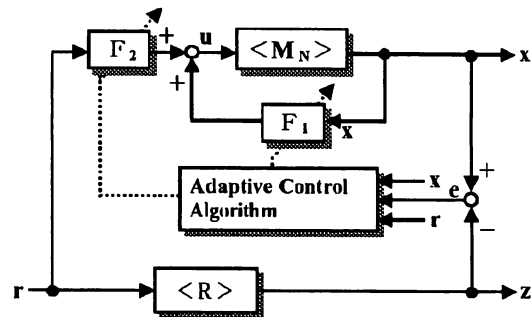


Fig.7 Blockdiagram of Model Reference Adaptive Control System

Table 2 Cutting Parameters

$D$	6.0[mm]	$Z$	2
$B$	6.0[mm]	$\phi_s$	180[deg]
$a$	1.0, 1.3[mm]	$n$	15.0[r.p.s]

5.4 制御実験結果

非制御時について、入力となる送り速度指令値は切込みが 1[mm] のときの切削力が 60[N] となるように設定した。被削材には Fig.8 に示すように階段状の段差がつけられているため、段差部分、すなわち切込み深さ 1.3[mm] で切削力が過大になることがわかる。したがってこの切削力の変動を制御により一定にすることが目的である。

切削力一定制御の結果について PID 制御結果を Fig.10 に、MRAC の結果を Fig.11 にそれぞれ示す。また非制御時と PID 制御、MRAC の結果を Fig.12 重ねて示す。実験条件は同定実験と同様で、被削材には制御の効果をわかりやすくするため 0.3[mm] に段差をつけ、切込み深さが通常の 1.0 から 1.3[mm] になるようにしている。PID 制御の目標切削力は 60[N] である。

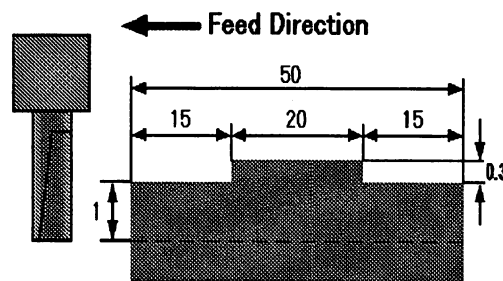


Fig.8 Workpiece Geometry

まず PID 制御結果について Fig.10 より、切込み開始部分のサンプリング  $k = 200$  で切削力のオーバーシュートが見られる。またサンプリング  $k = 300 \sim 500, 1250 \sim 1700$  の部分で切削力の定常偏差が残り、目標切削力である 60[N] への追従性があまりよくないことがわかる。定常偏差をなくすためには、ゲインパラメータを大きく取ることが有効であるが、切削に関してハイゲインのコントローラを用いると、切削力が振動的になってしまうためパラメータ決定には注意が必要である。

次に MRAC について Fig.11 より、規範モデルはサンプリング  $k = \infty$  で切削力が 60[N] に収束するように選択されている。結果より切削力は規範モデルによく追従していることがわかる。サンプリング  $k = 650$  あたり、すなわち段差の切りあがり部分で少しオーバーシュート気味になっているが、すぐに収束している。さらに切削終了まで規範モデルに追従している。

また Fig.12 については、目標値の 60[N] は非制御時に切込み深さ 1[mm] とした時の切削力としているので、被削材の段差の部分は過大な切削力、すなわち大きな送り速度指令で切削を行っていることになる。そのため、制御時に較べて切削時間が短い。PID 制御と MRAC を比較すると、MRAC のほうが目標切削力に追従していることがわかる。さらに目標値によりよく追従できている分、MRAC のほうが PID 制御に較べ切削時間が短くなっていることがわかる。これらのことより PID 制御より MRAC を用いたほうが良い結果を得られたことがわかる。

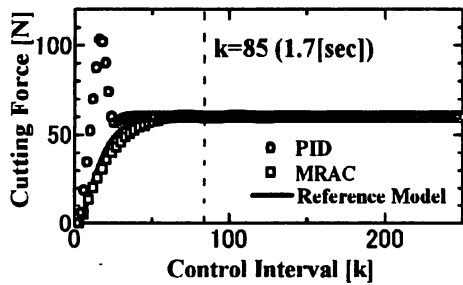


Fig.9 Simulation Results

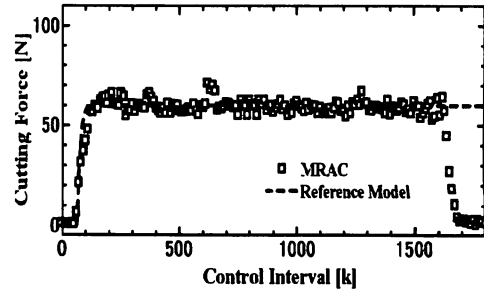


Fig.11 Experimental Result of MRAC

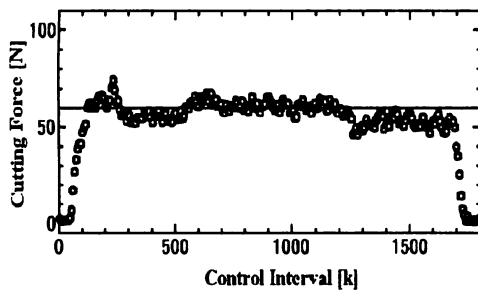


Fig.10 Experimental Result of PID Control

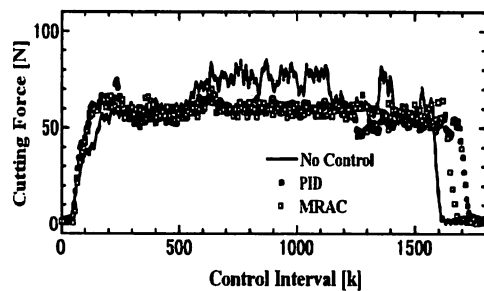


Fig.12 Experimental Results

## 6. 結 言

本研究では、エンドミル加工システムにおける加工モデルを同定実験により求めた。そしてエンドミル加工時において、切削力を一定にし制御を行う制御系を設計し、切削力一定制御を行った。その結果、切削現象における熱などのさまざまな非線形性から、固定ゲインである PID 制御より、モデル規範型適応制御を用いたほうが目標切削力への追従性能が良いことがわかった。また PID 制御に較べ、モデル規範型適応制御はわずかながら加工効率も良くなることがわかった。

## 参考文献

- 1) 前田輝幸, 川路茂保ほか: 切削加工トルクのインプロセス制御, 日本機械学会論文集 (C), 61-587, 2945-2952(1995)
- 2) Yusuf Altintas : Manufacturing Automation, Cambridge, (2000)
- 3) 大平研五: 工作機械の高速・高精度化, 日本機械学会誌, 97-911, 859-862(1994)
- 4) 足立修一: 制御のためのシステム同定, 東京電機大学出版局, (1997)
- 5) 大須賀公一: 非線形系の適応制御, コンピュートロール, No32, 52-58(1990)
- 6) 伊藤正美: 自動制御, 丸善株式会社, (1991)



## Control of an End Milling System for a Constant Cutting Force

Shinsaku FUJIMOTO\*, Kazunari ISHII\*\* and Kazumasa OHSAKA\*

*\*Department of Assistive and Rehabilitation Engineering,  
Okayama University of Science,*

*Ridai-cho 1-1, Okayama 700-0005, Japan*

*\*\*Makino Milling Machine CO., LTD.*

*Mimase 359-3, Aikawa-cho, Aikou-gun, Kanagawa 243-0308, Japan*

**(Received November 1, 2001)**

High efficiency and intelligence in production have been demanded in recent years. In particular, improving accuracy and reducing machining time are important in production. In order to realize these improvements, it is important to suppress the deformation of the machine tool. One approach is to increase the main spindle speeds and feed rates, but this requires control of the end milling system and measurement of the cutting forces. To control the end milling system, we need to equip the machine tool with various sensors, an actuator and a computer. It is also important to construct a control system that is adaptable to abnormal vibrations and disturbances by the cutting forces and cutting heat. Many papers have proposed suitable control methods on the cutting forces but there are few papers that have proposed a suitable control system design.

In this study, we try to control an end milling machine to achieve a constant cutting force. We construct a machining model by identification of an end milling control system, and compare the performance of two controllers that are the PID controller and Model Reference Adaptive Controller (MRAC) in the system. Results show that the MRAC has good performance compared with the PID controller, in terms of reduced cutting heat and compensated nonlinear characteristics.