エンドミル加工における切削抵抗の推定法*

— 主軸モータ電流とサーボモータ電流による切削力ベクトルの幾何学的合成による推定法 —

茨木 創一** 坂平 昌浩*** 新家 秀規† 松原 厚** 垣野 義昭**

On the Monitoring of Cutting Forces in End Milling Processes

— An Estimation Method by Geometrically Combining Force Vectors of Servo Motors and a Spindle Motor —

Soichi IBARAKI, Masahiro SAKAHIRA, Hidenori SARAIE, Atsushi MATSUBARA and Yoshiaki KAKINO

This paper presents a scheme to estimate cutting forces in end milling without using any additional sensors. An external disturbance can be estimated by monitoring the armature current in servo motors. It is, however, often subject to high friction on guideways, particularly in a stationary direction, which makes it difficult to estimate the disturbance in an accurate and stable manner. On the other hand, the armature current in a spindle motor is less affected by the friction, although only the tangential component of cutting force can be estimated. This paper proposes an estimation scheme of all the components of cutting force by geometrically combining force vectors given by servo motor and spindle motor currents. The accuracy and practical applicability of the proposed scheme are validated by experimental case studies, where the cutting force control for end milling processes is implemented based on the proposed estimation scheme.

Key words: process monitoring, cutting force estimation, end milling, engagement angle, motor loads

1. 緒 言

マシニングセンタに代表される NC 工作機械において、近年その高速・高加速度化が急速に進んでいる。しかし、これら高速機の能力を十分に活用して高効率な加工を行うことは、非熟練作業員にとって必ずしも容易ではない。高速・高精度な自動化加工を熟練者でなくても行えるようにするためには、切削条件などの自動設定や、オンラインでの加工条件の適応制御を自律的に行う生産システムが必要不可欠である¹⁾。このような観点から、著者らの研究グループでは自律的生産システムに必要な機能モジュールの研究開発を行ってきた²⁾。

特に、加工中の切削負荷をオンラインでモニタリングし、その変動に応じて送り速度などの加工条件を制御する適応制御手法は'80年代以降多くの研究がなされてきた³⁾。これまでの研究の多くは制御手法そのものに研究の主眼を置き、切削抵抗をモニタリングするためのインプロセスセンサについては十分な注意が払われていなかった。現在、圧電式などの工具動力計は広く市場に供給され、切削抵抗の適応制御の目的には十分な精度を有しているが⁴⁾、コスト面などの問題から広く実装することは現状では困難である。より安価なモニタリング手法として、主軸ユニットの曲げモーメントを歪みゲージで測定する Jeppson コントローラ⁵⁾、磁歪センサをホルダ内に実装する手法⁶⁾、主軸のたわみを変位センサを用いて測定する手法⁷⁾などが提案されているが、コスト面や信頼性の観点から広く普及するには至っていない。

最も安価な切削抵抗のモニタリング法は、NC 工作機械が動作制御用に通常備えているセンサ（本論文ではこれらのセンサを内部センサと呼ぶ）を利用する方法である。例えば、主

軸モータの電機子電流から切削トルクを推定する手法は従来から広く行われ⁸⁾、主軸モータ負荷を監視し、負荷が小さくなると送り速度を上げて生産効率を大にするというシンプルな適応制御システムを商品化している例もある⁹⁾。しかし、主軸モータの負荷から推定可能なのは切削トルクのみで、背分力成分は原理的に観測不可能である。一方、直交軸を駆動するサーボモータの電機子電流をモニタリングすれば、切削力の全ての成分が原理的には推定可能であり¹⁰⁾、これまでにドリル加工における軸方向力の制御のために実用化された例などが報告されている¹¹⁾。しかし、サーボモータの負荷は案内面の摩擦などの影響を大きく受けるため、小さな切削力の安定した観測は実用上困難であることが知られている⁸⁾。

本論文では最初に、内部センサのみを用いた切削抵抗の推定法の限界を、最新の NC 工作機械において実験的に検証した上で、主軸モータ電流とサーボモータ電流により推定される切削力ベクトルを幾何学的に合成する手法を用いて、付加的なセンサを用いず切削抵抗の全ての方向の成分を安定に推定する手法を提案する。

2. 内部センサによる切削抵抗の推定

2.1 送りモータの負荷モニタリングによる切削抵抗の推定

2.1.1 切削抵抗の推定法

通常、CNC は送り系のサーボモータの電機子電流をモニタリングし、そのフィードバック制御を行う必要がある。この情報を利用して、切削負荷の推定を行うことができる。電流センサによって測定された送りモータの電機子電流を i (A) とするとき、送り方向の切削負荷の推定値 $\hat{F}$ (N) は以下のように与えられる¹⁰⁾：

$$\hat{F} = \frac{2\pi}{p} K_t i - M \ddot{x} - \hat{f}(\dot{x}) \quad (1)$$

ここで、 $\dot{x}$ は送り方向のテーブル速度 (m/sec)、 $\ddot{x}$ はテーブル加速度 (m/sec²)、 p はボールねじのピッチ (m)、 K_t はサーボ

* 原稿受付 平成 16 年 1 月 7 日

** 正 会 員 京都大学工学研究科（京都市左京区吉田本町）

*** 学生会員 京都大学工学研究科

† (株) 森精機製作所（奈良県大和郡山市）

Table 1 Major specifications of Machine A

Spindle	
Speed, min ⁻¹	200 ~ 20,000
Output (15 min./cont.), kW	18.5/15
Feed drives	
Max. traverse speed, mm/min	42,000
Travels, mm	610(X), 510(Y), 460(Z)
Rated output of servo motors, kW	4.5
Type of guideways	linear ball guideway

Table 2 Cutting conditions

Workpiece	Carbon steel, S50C
Tool	Solid carbide end mill
Diameter, mm	10
Number of flutes	4
Tool extension, mm	35
Milling method	Downcut
Coolant	Air blow
Spindle speed, min ⁻¹	2,800
Axial depth of cut, mm	10
Feedrate, mm/min	250, 500, 1000 1500, 2000
Radial depth of cut, mm	0.15, 0.3, 0.5, 0.75 1.0, 1.5, 2.0, 3.0

モータのトルク定数 (Nm/A), M は移動体質量 (kg), $\hat{f}(\dot{x})$ は摺動面などに生じる摩擦力の推定値 (N) を表す. 上式で示されているように, サーボモータの出力 (第 1 項) から慣性力 (第 2 項) と摩擦力 (第 3 項) を差し引くことで外力を推定する (実際には適切なローパスフィルタが必要となる) 単純な推定法は, 一部の CNC システムでは実用化されている. ただし, 切削負荷の正確な推定のためには, M 及び $\hat{f}(\dot{x})$ の適切な同定が必要である.

2.1.2 検証実験

送り系のサーボモータ電流のモニタリングによる切削抵抗推定の精度を調べるため, 中型の縦型マシニングセンタ (機械 A) を用いて切削試験を行う. 機械 A の主な仕様を表 1 に示す. X, Y 軸のサーボモータの電機子電流値はサンプリング時間 1msec で観測し, データロギング用 PC 上に保存する.

一定送り速度で Y 軸方向への直線切削を行ったときの X, Y 軸の送りモータの電機子電流値をモニタリングし, 式 (1) によりそれぞれの方向の切削抵抗成分を推定し, 圧電式 4 分力工具動力計による実測値と比較する. ただし本実験では, 式 (1) 中の摩擦モデル $\hat{f}(\dot{x})$ は, 簡単のため定数 (すなわち, $\hat{f}(\dot{x}) = -f_0 \cdot \text{sign}(\dot{x})$. ただし, f_0 は定数 (N)) とした. 切削条件を表 2 に示す. 半径方向切り込み量 R_d , 送り速度 F を表中に示すように変え, 計 40 通りの組み合わせで切削抵抗の実測値と推定値の平均値を比較した結果を図 1(a)(b) に示す.

Y 軸方向, すなわち送り方向については, 推定値と測定値は比較的良好な線形関係にある (誤差の平均 15.1N, 標準偏差 47.7N). しかし X 軸方向, すなわち静止軸方向については, 誤差は非常に大きく, 測定値と推定値の関係は非線形挙動を示している. これは静止軸方向については摺動面などに作用する摩擦が大きく, 切削力が摩擦抵抗と相殺され, サーボモータの負荷に正確に反映されないためである. また, サーボモータの負荷は摺動面の潤滑状態などの影響を受けやすく, サーボモータ電流は不安定な波形を示す場合が多い. また, 機械 A の送り系は転がり案内であるが, 滑り案内の機械の場合には摩擦の影響は一般に更に増大する.

(a) Y direction (moving direction)

(b) X direction (stationary direction)

Fig. 1 Comparison between measured cutting forces (horizontal axis) and their estimates by monitoring servo motor currents only (vertical axis)

2.2 主軸モータの負荷モニタリングによる切削抵抗の推定

2.2.1 切削抵抗の推定法

主軸モータの電機子電流から切削トルクを推定する手法は従来から広く行われており, 多くの CNC では主軸モータ負荷を画面に表示し, オペレータに過負荷を知らせる機能を有している. 主軸モータの電機子電流を i_s (A) とするとき, 切削トルクの推定値 $\hat{T}$ (Nm) は以下のように与えられる:

$$\hat{T} = K_{ts} \cdot i_s \quad (2)$$

ここで, K_{ts} は主軸モータのトルク定数 (Nm/A) であり, 一般に回転数に依存し, 低回転数域では弱め界磁などの影響も考慮する必要がある. なお, 定常状態では摩擦の影響及び慣性力の影響は切削トルクと比較して十分小さいと仮定し, 無視することが通常は可能である.

2.2.2 検証実験

2.1.2 と同様に, 機械 A を用いて一定送り速度で Y 軸方向への直線切削を行ったとき, 主軸モータ電流から切削トルクを推定し, 圧電式工具動力計による実測値と比較した結果を図 2 に示す. 切削条件は表 2 に示したものと同一である. サーボモータ電流のみを用いた場合と比較すると, 低負荷の時にも良好な線形関係が保たれていることが分かる. ただし, 切削トルクの実測値と推定値の比の平均は約 1.25 であり, この差はモータのトルク定数 K_{ts} の仕様値の誤差, 及び動力計により測定された切削力を切削トルクに換算する際の誤差と思われる. この比率を用いて推定値を換算すると, 実測値と推定値の誤差の平均は 0.012Nm, 標準

Fig. 2 Comparison between measured cutting torques (horizontal axis) and their estimates by monitoring spindle motor currents only (vertical axis)

偏差は 0.126Nm と非常に良好な結果となった。

主軸モータ電流には摩擦の影響が小さく、特に最新の CNC ではサンプリング処理速度の向上により、切削トルクの推定が高精度に行えることが分かる。しかし、切削トルク以外の負荷成分、すなわち切削点における背分力成分の推定は原理的に不可能である。

3. 主軸モータ電流とサーボモータ電流による切削力ベクトルの幾何学的合成による推定法

3.1 切削抵抗の推定法

前節で示した通り、サーボモータ負荷及び主軸モータ負荷による切削抵抗の推定には、1) サーボモータ負荷による切削抵抗の推定では、摺動面などに作用する摩擦の影響が大きく、特に静止軸方向は静止摩擦が切削抵抗推定の外乱となるため、小さな切削抵抗を安定してモニタリングすることは困難である、2) 主軸モータ負荷による切削トルクの推定は、サーボモータの場合より安定したモニタリングが可能であるが、切削点における背分力成分は原理的に推定不可能である、という問題がある。本研究では、これらの情報による切削力ベクトルを幾何的に合成することで、切削抵抗の全ての分力をより安定してモニタリングする手法を提案する。

図 3 に直線切削時の切削抵抗の分力を模式的に表す。ここで、 F が水平面内の切削抵抗の向きと大きさ (N) を表すベクトル、 F_m はその工具進行方向の分力、 F_s は進行方向に垂直な方向の分力を表す。同様に、 F_t は切削点における接線方向の分力、 F_n は法線方向の分力を表す。また、 R_d は半径方向切り込み量 (m)、 r は工具半径 (m)、 α_{en} は切削関与角 (rad) を表す。なお、本論文では太字で示された記号 (例: F) は $\mathbb{R}^2$ 空間のベクトル、細字の記号はスカラー量を表す。

2.2 で検証したように、 $F_t := |F_t|$ は主軸モータ負荷のモニタリングにより、比較的高精度な推定が可能である。また、2.1 で示したように、送り方向成分 $F_m := |F_m|$ は静止軸方向成分 $F_s := |F_s|$ と比較して摩擦の影響が小さく、サーボモータ負荷のモニタリングにより安定した推定が比較的容易である。ここで、切削関与角 $\alpha_{en}(\text{rad})$ が既知であると仮定すれば、その他の分力は以下のように幾何学的関係から求められる。

$$\begin{bmatrix} F_n \\ F_s \end{bmatrix} = \frac{1}{\sin(\alpha_{en})} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\alpha_{en}) \\ \cos(\alpha_{en}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_m \\ F_t \end{bmatrix} \quad (3)$$

Fig. 3 Cutting force vectors in end milling

切削抵抗の合力の大きさ $F := |F|$ は以下により与えられる：

$$F = \sqrt{F_m^2 + F_s^2} \quad (4)$$

すなわち、サーボモータ負荷及び主軸モータ負荷から比較的精度よく推定できる分力のみを幾何的に組み合わせることで、すべての方向の分力を求めることができる。

3.2 検証実験

2.1.2 と同様に機械 A を用いて、一定送り速度で Y 軸方向への直線切削を行い、サーボモータ及び主軸モータ負荷を観測し、上記の方法により静止軸方向である X 軸方向の切削抵抗 (すなわち F_s) を推定した結果を図 4 に示す。切削条件は表 2 に示したものと同一である。切削関与角 α_{en} は、工具径 r と径方向切り込み量 R_d から幾何的に決定される。誤差の平均 13.2N、標準偏差 11.1N であり、サーボモータ負荷のみから推定した場合 (図 1(b)) と比較して誤差は大幅に低減された。また、同様に合成切削抵抗 F の推定値と実測値の比較を、両推定法について行った結果を図 5 に示す。(a) サーボモータ負荷のみから推定する場合には、誤差の平均 45.1N、標準偏差 38.9N であったのに対し、(b) 提案した推定法では、誤差の平均 31.7N、標準偏差 69.1N であり、大幅な改善が見られた。

確認のため別の縦型マシニングセンタ、機械 B でも同様の実験を行った。機械 B の主な仕様を表 3 に示す。機械 B の送り系はすべり案内を持ち、転がり案内を持つ機械 A よりも摩擦の影響がより大きい。

例として、送り速度 F を 1,000mm/min、径方向切り込み量 R_d を 1.0mm として、その他の加工条件は表 2 と同一とした場合の、a) 送り方向 (Y 方向) の切削分力のサーボモータ電流による推定値、b-1) 静止軸方向 (X 方向) の切削分力のサーボモータ電流のみによる推定値、b-2) 静止軸方向 (X 方向) の切削分力の提案手法による推定値、をそれぞれ動力計による実測値と比較した結果を図 6 に示す。(b-1) から明らかのように、静止軸方向のサーボモータ電流は摩擦の影響から、切削抵抗を安定して推定することは困難である。サーボモータ電流に加え、主軸モータ電流の情報を組み合わせる提案手法の優位性は明らかである。

4. ケーススタディ

4.1 切削抵抗の一定化による工具倒れ量の制御

提案した切削抵抗のモニタリング手法を用いたケーススタディとして、切削抵抗制御による高精度エンドミル加工の試験を行った。図 7(a)(b) に加工形状を模式的に示す。Y 軸方向に直線切削を行うのに対し、被削材は予め斜めに加工してあり、径方向切り込み量が 0 ~ 2.0mm まで進行方向に沿って単調増加する。一定送り速度で加工した場合、切削抵抗は徐々に増加し、工具倒れの影響から削り残し量も増大する。工具倒れ

Fig. 4 Comparison between measured cutting forces in the X direction (i.e. stationary direction) (horizontal axis) and their estimates by the proposed scheme (vertical axis)

(a) Estimated by monitoring servo motor currents only. (b) Estimated by the proposed scheme.

Fig. 5 Comparison between the estimates of the cutting force in the XY plane, F , by (a) monitoring servo motor currents only, and (b) the proposed scheme.

Table 3 Major specifications of Machine B

Spindle	
Speed, min^{-1}	200 ~ 20,000
Output (15 min./cont.), kW	22/18.5
Diameter, mm	65
Feed drives	
Max. traverse speed, mm/min	33,000
Max. acceleration, G	0.67(X), 0.64(Y), 0.57(Z)
Travels, mm	630(X), 410(Y), 460(Z)
Rated output of servo motors, kW	3.5(X) 4.5(Y,Z)
Type of guideways	linear slide guideway

量を一定化するためには、加工面に対して垂直な方向の切削抵抗をモニタリングし、それを一定化するように送り速度を制御する手法が有効であると考えられる¹²⁾。この方向の分力は静止軸方向であるため、サーボモータ電流または主軸モータ電流単独のモニタリングでは安定した推定は困難であり、そのため提案手法が有効である。径方向切り込み量が0.5 ~ 2.0mmまで変化する箇所を制御の対象とし、その他の加工条件は表2に示したものと同一とした。

モニタリングした切削抵抗値を用いて直接にフィードバック制御を行う方法は、測定系や制御系に含まれる無駄時間のために切削抵抗の急激な変化に対応するのが困難で、また切削抵抗の推定値に含まれるノイズの影響を受けやすい。ここでは、切削抵抗一定化制御のために、学習制御手法¹³⁾を用いる。この手法は、1) 変形前の最大切りくず厚さ、2) 切削円弧長、という工具とワークの幾何的干渉から定まる2つのパラメータ

(a) Comparison in the moving direction (Y) (the estimate is based only on Y-axis servo motor current)

(b-1) Comparison in the stationary direction (X) (the estimate is based only on Y-axis servo motor current)

(b-2) Comparison in the stationary direction (X) (the estimate is given by the proposed scheme)

Fig. 6 Comparison between measured and estimated cutting forces

を決定変数として切削抵抗を予測するモデル¹⁴⁾を用いて、切削抵抗の一定化のための送り速度の最適化を行う手法である。同様の加工が繰り返される場合、1サイクル毎にモニタリングした切削抵抗を基としてモデルの係数を更新することで、学習的に制御性能を改善する。予測モデルのデータベースを必要とせず、切削抵抗の変動が早い加工では直接的なフィードバック手法より良好な制御性能が得られやすい¹³⁾。

4.2 実験結果と考察

はじめに、一定送り速度 $F = 1120 \text{ mm/min}$ で加工を行ったときの加工面に垂直な方向(X軸方向)の切削抵抗を、提案した手法により推定した結果を図8(a)に示す。比較のため、図中には動力計による測定値も示している。次に、切削抵抗の推定値を用いて切削抵抗の予測モデルを同定し、目標切削抵抗値を222Nとして、送り速度の最適化を行う。最適化された送り速度で同じ形状を加工した場合の切削抵抗の推定値及び測定値を図8(b-1)に、さらに上記の学習制御のプロセスをもう一度繰り返した場合の結果を図8(b-2)に示す。学習制御を繰り返すことによって、切削抵抗の予測モデルがより正確に同定され、その結果切削抵抗が目標値にほぼ制御できていることが分かる。また、被削材の上部より5mmの地点をY軸方向に沿って、加工面の削り残し量をマイクロメータを用いて測定した結果を図9に示す。切削抵抗の一定化により、工具倒れ量が均一化し、削り残し量が低減しほぼ一定化できたことが確かめられた。

提案した手法を用いても、径方向切り込み量 R_d が極端に小さくなる(切削関与角 α_{en} が小さくなる)と、図3から明らかなように、主軸モータ電流から送り方向に垂直な切削抵抗の分力を推定することは困難となり、提案したモニタリング手法の効果は小さくなる。3.2で示した検証実験では、 $\alpha_{en} > 14^\circ$ ($R_d > 0.15 \text{ mm}$) の条件で提案した手法の推定精度を検証し

Fig. 7 Schematics of machining experiments

Fig. 8 Measured and estimated cutting forces with and without the iterative learning control of feedrate

Fig. 9 Surface error profiles to the normal direction measured along the Y direction

た．また，提案したモニタリング手法は切削関と角 α_{en} が既知であることを前提としている．しかし， α_{en} は R_d 及び工具半径 r によって定まるパラメータであるため，通常 CNC に与えられるパラメータではない．著者らは，自律的生産システムの枠組み²⁾ のなかで，CAM システムと CNC との情報共有によるパラメータの供給，あるいは予め定められた工具パスが用いられるエンドミル加工用固定サイクル内での適用，という形での本手法の実用化を検討している．

5. 結 論

エンドミル加工時の切削抵抗を，送り系のサーボモータと主軸モータの電機子電流から推定する手法を提案し，その精度を検証した．得られた主な結論は以下の通りである．

- (1) 摩擦力の影響の少ない送り方向のサーボモータ電流と，主軸モータ電流から推定される切削力ベクトルを幾何的に合成し，切削抵抗の全ての成分を推定する方法を提案した．
- (2) 直線切削において提案した手法の推定精度を確認したところ，25 ～ 1600N の切削抵抗について推定誤差の平均は約 32N であり，サーボモータ電流のみをモニタリングした場合と比較して大幅な改善が見られた．また，案内方式の異なる 2 種の機械で検証実験を行い，提案した手法の一般性と有効性を確認した．
- (3) 提案したモニタリング手法を基礎として，加工面に垂直な切削抵抗分力を一定化するための送り速度の学習制御を行い，削り残し量の一定化に有効であることを確認した．

提案した手法は，付加的なセンサを必要とせず切削抵抗の推定が可能であるという点で実用的であるが，切削関と角 α_{en} が既知である必要がある．CAM システムとの情報共有や固定サイクル内での適用など，実用的な適用法に関して今後検討していく．

謝 辞

本研究の一部は，文部科学省科学研究費補助金（課題番号：15560094）の助成によって行われた．

参 考 文 献

- 1) 松原 厚：機械加工におけるプロセス計測 / 制御技術の現状と動向，計測と制御，41, 11 (2002) 781.
- 2) Sato, T., Kakino, Y., Matsubara, A., Ibaraki, S., Saraie, H., Proposal of the Extended System Framework of Intelligent Machine Tool, *Proc. of 2002 Japan-USA Symp. on Flexible Automation*, (2002) 15.
- 3) 例えば，Altintas, Y., *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, Cambridge University Press, (2000).
- 4) キスラー切削圧電式動力計カタログ，日本キスラー株式会社，(1997).
- 5) Tu, J. F., Corless, M., Jeppson, J., Robust Control of High Speed End Milling Operations, *Proc. of 2002 Japan-USA Sympo. on Flexible Automation*, (2002), 14.
- 6) Ohzeki, H., Mashine, A., Aoyama, H., and Inasaki, I., Development of a Magnetostrictive Torque Sensor for Milling Process Monitoring, *ASME J. of Manuf. Sci. and Eng.*, 121 (1999), 615.
- 7) Matsubara, A., Kakino, Y., Ogawa, T., Nakagawa, H., and Sato, T., Monitoring of Cutting Forces in End-milling for Intelligent Machine Tools, *Proc. of the 5th Int'l Conf. on Prog. of Machining Tech.*, (2000), 614.
- 8) 例えば，Kaefer, M., Brouer, N., Rehse, M., and Weck, M., NC Integrated Process Monitoring and Control for Intelligent Autonomous Manufacturing Systems, *Proc. of the 29th CIRP Int'l Seminar on Manufacturing Systems*, (1997) 69.
- 9) OMAT Control Technology 社：カタログ，Optimil (1998)
- 10) 例えば，Altintas, Y., Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 114 (1992), 386.
- 11) Fujishima, M., Kakino, Y., Yamaoka, Y., Fukui, S., High Productive and Safety Drilling of Hard-to-cut Materials by Intelligent Machine-Tools, *Progress of Machining Technology*, (2002), 456.
- 12) 中川 平三郎，広垣 俊樹，中山 真依子，大塚 裕俊，垣野 義昭，山路 伊和夫：5 軸制御マシニングセンタによる多刃エンドミル加工面の高精度化 軸方向切削幅制御による側面切削時の切削抵抗一定化，精密工学会誌，69, 3 (2003)，385.
- 13) Ibaraki, S., Ogawa, T., Matsubara, A., and Kakino, Y., Model-based Learning Control of Cutting Forces in End Milling Processes, *Proc. of 2002 Japan-USA Sympo. on Flexible Automation*, (2002), 401.
- 14) 垣野 義昭，大塚 裕俊，中川 平三郎，佐々木 将志：焼入れ鋼のエンドミル加工に関する研究（第 1 報）- 切削抵抗の簡易推定式とそれを用いた切削抵抗の一定化制御 -，精密工学会誌，66, 5 (2000)，730.