

# 知能化工作機械によるエンドミル加工制御（第2報）

## －モデルの学習的同一に基づいた切削抵抗制御－

京都大学 茨木 創一, 小川 高志, 松原 厚, 垣野 義昭  
大分県産業科学技術センター 大塚 裕俊  
森精機製作所 新家 秀規

### 1 緒言

高速・高精度なエンドミル加工の自律化を図るためには、切削条件の最適化が重要な課題である。特に加工中の切削抵抗の制御は、切削抵抗の変動を避けることで工具寿命を最適化し、加工の高効率化を図るために重要であることは広く認識され、これまでに多くの研究が報告されてきた。切削抵抗制御の手法は、二つに大別される。一つは、測定あるいは推定された加工中の切削抵抗をフィードバックし、送り速度などを適応制御する手法である<sup>1)</sup>。フィードバック制御手法の実用化に際しての最大の課題は、安価で信頼性のあるプロセスモニタリング方法の確立であるが<sup>2)</sup>、さらにフィードバック制御の本質的性格から、プロセスの急激な変化に対応するのは難しく、例えばコーナ部などでの切削抵抗の急激な増大や、自由曲線など形状条件が常に変化する場合は制御が難しい。

その一方、フィードフォワード制御的に切削抵抗モデルに基づいて予め送り速度を決定する手法は、単純でありながら、そのような問題に対応するのが比較的容易である。ただし制御性能は完全にモデルの精度に依存するため、切削プロセスのモデル化が重要な課題となる。著者の研究グループは切削抵抗の簡易推定式を提案し、モデルの有効性及びそれに基づいた切削抵抗制御の有効性を実験によって示した<sup>3)</sup>。推定式の係数は加工条件を様々に変えて行われる同定実験により、回帰分析を用いて決定される。

このような実験によるモデル同定の問題は、実際の加工と同定実験とでは条件が異なり、誤差が発生する可能性があること、切削結果が良好でなかった場合にモデルを修正する方法がないこと、工具磨耗の進行による切削特性の変化に対応できないこと、などが挙げられる。そこで、本論文では、実際の加工時の切削抵抗からモデルをオンライン同定する手法を考える。予測モデルに基づいた「試し加工」と、モデルの再同定を繰り返すことによって、学習的に制御アルゴリズムを改善する方法を提案し、その効果を確認するための基礎的な実験を行った。

### 2 切削抵抗の推定式とその同定

垣野ら<sup>3)</sup>は、変形前の最大切りくず厚さ  $t_m$  と切削円弧長  $L$  を説明変数として、切削抵抗特定を次式のように2次の応答曲面を用いてモデル化した。

$$\hat{y} = C_0 + C_1x_1 + C_2x_2 + C_{11}x_1^2 + C_{22}x_2^2 + C_{12}x_1x_2 \quad (1)$$

ここで、 $x_1$  及び  $x_2$  はそれぞれ  $t_m$ ,  $L$  を標準切削条件を基準に正規化したもの、 $\hat{y}$  は切削抵抗の推定値を表す。上のモデルに含まれる係数 ( $C_0, C_1, C_2, C_{11}, C_{22}, C_{12}$ ) は、垣野らの研究<sup>3)</sup>では、計10回の直線切削からなる同定実験によって同定される。それに対し本研究では、実際の加工時の切削抵抗の測定値だけを用いてそれらを同定する。すなわち、切削抵抗の測定値が  $y(k)$  ( $k = 1, \dots, T$ ) で与えられたときに、 $\|y(k) - \hat{y}(k)\|_2$  で定義されるモデル化誤差が最小化されるように、逐次最小二乗法を用いて係数を決定する。

同定実験によるモデル同定は様々な加工条件に対して良好な推定精度が期待できるが、実用面では前節で述べたような欠点がある。一方、実際の加工時の切削抵抗からモデルを決定するこの手法は、特に同様の形状を多数加工する部品加工などを想定した場合、学習的にモデルを更新し、加工条件を徐々に最適値に近づけていく学習的制御に最適である。すなわち、モデルの学習的同一に基づいた切削抵抗制御の手順は、以下ようになる。

- (1) 切削抵抗の初期モデルは与えられているものとする。
- (2) 与えられたモデルに基づき、切削抵抗を一定化するための送り速度を計算する。

- (3) 実際の加工を行い、切削抵抗を測定する。
- (4) もし切削抵抗が目的値に制御されていないならば、測定した切削抵抗のデータを用いて、モデルを修正する。新しいモデルを用いて、(2) からやり直す。

### 3 切削抵抗の学習的制御

本論文で提案したモデルの学習的同一に基づいた切削抵抗制御の有効性を確認するために、Fig.1に示す単純なパスを用いた切削実験を行った。実験条件は以下の通り。工具：コーティング超硬ソリッドエンドミル（直径10mm、刃数4、突き出し量35mm）、ワーク材料：炭素鋼 S50C、工作機械：高精度立型マシニングセンタ、主軸回転数：2800rpm、軸方向切り込み：10mm、径方向切り込み：1.5mm、切削形態：ダウンカット。加工時の切削抵抗の測定は動力計を用いた。

Fig.2(a)は初期加工として、一定送り速度  $f = 1000\text{mm/min}$  で Fig.1のパスを加工した際の切削抵抗の測定値と、初期モデルによる推定値を示したものである。初期モデルによる切削抵抗の推定値は測定値と大きく異なっているため、測定値に基づき逐次最小二乗法によりモデルの係数を同定し直す。さらに、同定されたモデルを用いて、切削抵抗が350Nに一定化されるように、直線部及び円弧部での送り速度を計算する。Fig.2(b)は2度目の加工時の切削抵抗の測定値を示す。もう一度モデルの同定・送り速度の最適化を繰り返した後の、3度目の加工結果を Fig.2(c)に示す。切削抵抗の目標値からの定常誤差は5%以内だったので、実験はこの段階で終了した。

初期モデルが現実の切削プロセスにある程度近く、初期加工における切削条件をそれに基づいて決定すれば、上の実験例のように一定送り速度の加工からスタートした場合よりも早く、安定した学習が行えると期待できる。実際に、異なる材質 (S55C) のワークを用いて予め同定したモデルを初期モデルとして同様の実験を行ったところ、2度目の加工で切削抵抗の定常誤差は5%以内に収まった。

### 参考文献

- 1) 例えば、R. Landers and G. Ulsoy: Model-based Machining Force Control, ASME J. of Dynamic Sys., Meas., and Cont., **122**, 3 (2000), 521-527.
- 2) 松原 厚ほか: 知能化工作機械によるエンドミル加工制御 (第1報) - 切削抵抗の監視と一定化制御 -, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2001), 18.
- 3) 垣野 義昭ほか: 焼入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**, 11 (2000), 1792-1796.

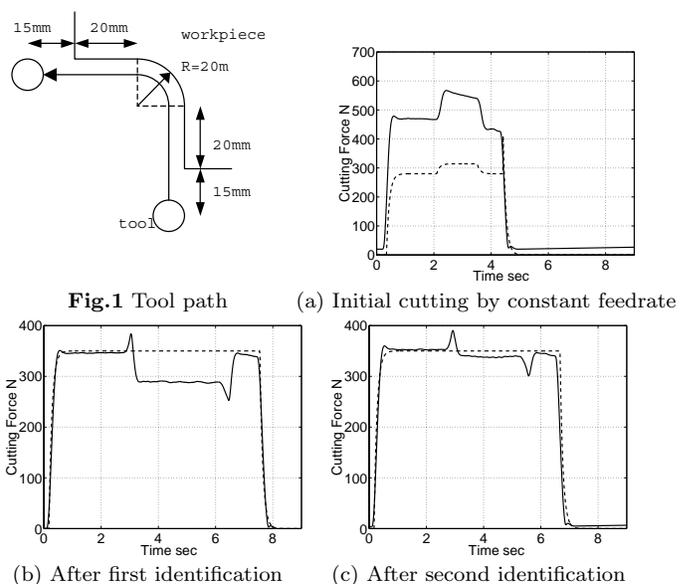


Fig.2 Measured and simulated cutting force profiles (solid lines: measured, dashed lines: simulated)