

エンドミル加工における切削抵抗のモニタリング（第2報） —固定サイクルにおける切削抵抗予測モデル同定への適用—

京都大学 ○安田 朋広, 茨木 創一, 松原 厚, 垣野技術研究所 垣野 義昭

On the Monitoring of Cutting Forces in End Milling Processes (2nd Report)

— The Application to the Identification of a Prediction Model of Cutting Forces within Canned Cycles —

Kyoto University Tomohiro YASUDA, Soichi IBARAKI, Atsushi MATSUBARA, and
Kakino Research Institute Yoshiaki KAKINO

Control strategies of cutting forces in end milling process have been long studied as a methodology to autonomously optimize cutting conditions. In particular, a model-based feedforward control approach has been recognized as a simple, and yet practical way to regulate the cutting force. This paper proposes an identification scheme of a prediction model of cutting force, and a control scheme of feedrate based on it. Model identification cycles are embedded within a canned milling cycle, where the cutting force is estimated from servo motor loads and then a prediction model of cutting force is identified. By performing the cutting force control based on the identified model in post processes, it is experimentally validated that the machining efficiency is significantly improved, while avoiding an excessive tool load.

1. 緒論

近年急速にマシニングセンタの高速・高加速化が進んでいるが、このようなマシニングセンタの性能を十分に活用し、高能率な加工を行うためには、加工条件の決定や加工工程の監視など非熟練者にとって困難な点が多い。そこで加工システム自身が最適な加工条件を自律的に決定し、加工状態に基づき加工条件を適応できることが求められている。その方法として、加工時の切削抵抗を常時モニタリングし、フィードバック制御を用いて切削抵抗を適切なレベルに制御する手法はこれまで広く研究されてきた。しかし、特にエンドミル加工の場合、そのような手法を実際に適用する際に最大の問題となるのは一般に切削抵抗のモニタリング精度である。エンドミル加工では切削抵抗が比較的小さい場合が多く、また摺動抵抗などの影響によりサーボモータ電機子電流から切削抵抗を推定することは一般に困難である¹⁾。動力計などの外部センサを用いれば切削抵抗を十分な精度でモニタリングできるが、コスト面などの問題から実用的ではない。

もう一方のアプローチとして、加工プロセスをモデル化し、モデルに基づいて予め加工条件を最適化するという、フィードフォワード制御の手法もこれまでに多く考えられている。この手法は加工プロセスの急激な変化にも比較的安定して対応でき、より実用的であると言える²⁾。しかし、エンドミル加工は、工具と工作物材種の組み合わせが多様であり、全ての組み合わせを網羅するモデルのデータベースを構築することは実用上不可能である。したがって、実際の加工に使用される工具や工作物材種の組み合わせに応じて、そのつど切削実験により同定するのが現実的であると考えられる。しかし、現場のオペレータにモデルを同定するための実加工とは別の切削実験を強いることは、実用上難しい。

そこで本研究では、実際の加工中にしばしば用いられる固定サイクルの中に切削抵抗予測モデルの同定を行うための工程を埋め込み、実加工中に切削抵抗予測モデルを同定する手法を提案する。このとき、切削抵抗のモニタリングには動力計などの外部センサを用いず、NC 工作機械の制御系が通常備えているサーボモータの電機子電流センサのみを使用する。そのため、外部センサを導入するための余剰コストは発生しない。

2. 切削抵抗予測モデル

本論文では、大塚ら²⁾が提唱したエンドミル加工時における変形前の最大切りくず厚さ t_m と切削円弧長 L を2つの説明変数として、切削抵抗を予測するモデル同定を対象とする。

$$Y = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_1^2 + C_4 X_2^2 + C_5 X_1 X_2 \quad (1)$$

$$\text{ここで, } X_1 = (t_m - t_{m0}) / \delta t_m \quad (2)$$

$$X_2 = (L - L_0) / \delta L \quad (3)$$

ここで、 $C_0 \sim C_5$ は定数である。また、 t_{m0} 、 L_0 (mm) はそれぞれ説明変数 t_m 、 L の標準値、 δt_m 、 δL (mm) はそれぞれ t_m 、 L の変動幅であり定数である。

エンドミル加工のための固定サイクルとして、本論文では内円広げ固定サイクルを取り上げる。内円広げ固定サイクルとはドリルもしくはエンドミルによって加工された穴の径を、内円筒面を切削することで目的とする径まで広げる加工である。工具中心経路の一例を図1に示す。なお、内円広げ固定サイクルでは各サイクルにおいて定常的な加工が行われるので、本論文で提案するモデル同定法に適しているが、提案する手法は内円広げ固定サイクルに限定されるものではなく、トロコイド溝加工固定サイクルなど、様々な固定サイクル内で適用可能であると考えている。

3. 加工条件設計および切削抵抗のモニタリング

・加工条件決定の手順

円弧切削中の切削パラメータの幾何学的関係は以下のようになる。

図2の三角形 OBA において

$$R_n = r - r \cdot \cos(\alpha_{em}^i) - \sqrt{R_{n-1}^2 - r^2 + r^2 \cdot \cos^2(\alpha_{em}^i)} \quad (4)$$

(n=1,2,3...)

内円広げ固定サイクルにおいて、まず(2)および(3)式における、 t_{m0} 、 δt_m 、 L_0 、 δL (mm) を決定する。これらの値は工具メーカーが推奨する標準切削条件などから決定する。次に X_1 、 X_2 が標準値を中心に一定範囲内で変化するように各サイクルにおける送り速度 f_n および(4)式より各サイクルの半径 R_n を決定する。

・加工時の切削抵抗のモニタリング法

① 加工に用いるプログラムの空送りを行い、そのときのサーボモータ電機子電流を測定する。

② 実際に加工を行い、サーボモータ電機子電流値を測定する。

③ ①、②で得られたデータから切削抵抗の値を推定する。①で得られたサーボモータ負荷のプロフィールには、摺動面の摩擦や慣性力などの影響のみが含まれる。したがって、②で得られたサーボモータ負荷のプロフィールとの差を計算することにより、切削抵抗による影響のみを正確に抽出できる。

内円広げ固定サイクルの各サイクルでは、半径方向切込量及び送り速度は一定であるため、切削抵抗の大きさは定常値となる。前報¹⁾でも報告したように、サーボモータ電機子電流は摺動抵抗の影響を大きく受け、リアルタイムでの安定した切削抵抗推定は一般に難しいが、定常値に限れば十分な精度で推定可能であり、モデル同定の目的には十分であると言える。

・切削抵抗予測モデルの係数の同定法

上で決定した条件で切削を行いそのときの各サイクルにおける説明変数 t_m 、 L と得られた切削抵抗値から、最小2乗法を用いて切削抵抗予測モデルの係数($C_0 \sim C_5$)を同定する。

4. 切削抵抗予測モデル同定実験

・実験方法

3章で示した方法により、切削条件を決定し、サーボモータ電機子電流を用いて切削抵抗をモニタリングして切削抵抗予

測モデルの同定実験を行う。実験条件は以下のとおりである。
 工具：(Ti,Al)Nコーティング超硬ストレートエンドミル（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：2800 min⁻¹、軸方向切込量：10mm、切削形態：ダウンカット、クーラント：オイルミスト。各サイクルにおける説明変数 X₁ 及び X₂ の値を図 3 に示す。

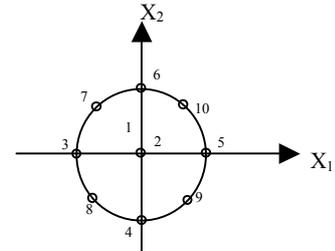


図 3 切削条件

・結果および考察

図 4, 5 に内円広げ固定サイクルにおける切削抵抗のサーボモータ電機子電流による推定値と動力計による実測値の比較を示す。これらより定常状態での誤差の平均値は約 22N で、サーボモータ電機子電流からの切削抵抗予測モデルの同定が十分な精度で行えていることがわかった。

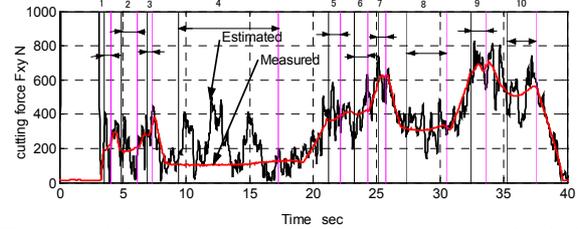


図 4 切削抵抗のサーボモータ電機子電流による推定値と動力計による実測値の比較（合成切削抵抗）

5. ケーススタディ

・加工手順

ポケット形状をもつキャビティを以下の固定サイクルの組み合わせで図 6 に示す工具パスを用いて加工する場合を考える。

① ヘリカル加工(螺旋状パスに沿って穴加工を行う工程)で下穴をあける。この工程は本ケーススタディでは最適工程設計の対象としない。

② 内円広げ加工固定サイクルで穴を広げながら切削抵抗予測モデルを同定する(図 6(a))。

③ ②で得られたモデルに基づいてトロコイド溝加工固定サイクル、隅加工固定サイクルにおける送り速度の最適化を行い、加工を行う(図 6(b))。

・結果および考察

図 7 に送り速度を制御した場合と制御しなかった場合のトロコイド溝加工と隅加工の固定サイクル中の切削抵抗値を示す。同定された切削抵抗予測モデルに基づく送り速度の制御により、切削抵抗が目標値である 300N にほぼ一定化されたことが分かる。また、送り速度の制御により、一定送り速度の場合には切削抵抗が目標値を下回る箇所でも送り速度を上げることが出来るため、最大切削抵抗は約 300N のまま、加工時間を 212 秒から 147 秒に短縮でき、切削抵抗一定化制御による加工能率向上の効果が確認できた。

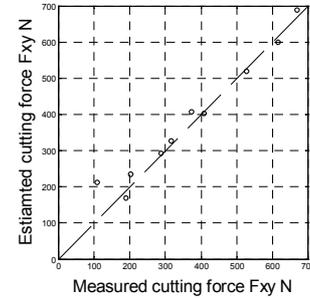


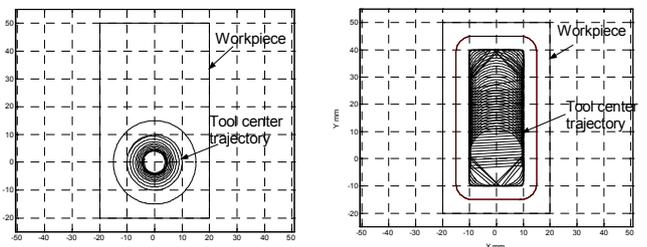
図 5 各サイクルにおける切削抵抗(合成切削抵抗)の平均値の推定値(縦軸)と実測値(横軸)の比較

6. 結言

切削抵抗予測モデルの同定を、実際のエンドミル加工に多く用いられる固定サイクル中に行う方法を提案し、その妥当性を確認した。

参考文献

- 1) 坂平, 茨木, 松原, 垣野, 新家: エンドミル加工における切削抵抗のモニタリング, 2003 年度精密工学会秋季大会講演論文集, (2003) 600
- 2) 大塚裕俊: 焼入れ金型のエンドミル加工における切削抵抗の推定と制御に関する研究, 京都大学 学位論文 (2002)



(a)内円広げ加工固定サイクル (b)トロコイド溝及び隅加工
 図 6 ケーススタディ形状

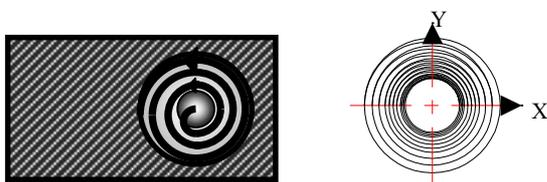


図 1 内円広げ固定サイクルの工具中心経路の一例

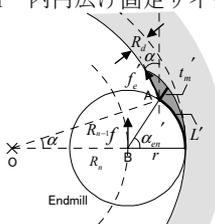


図 2 円弧切削時の工具と工作物の幾何学的な干渉関係

- R_n : n 周目の内円筒半径
- r : 工具半径
- R_d : 半径方向切込量
- α_{en} : 切削関与角
- f_n : 送り速度

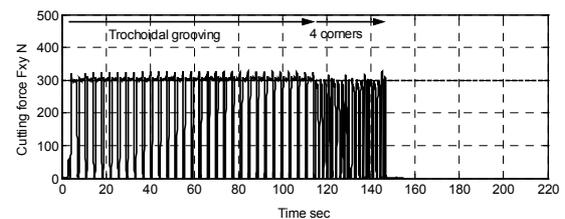
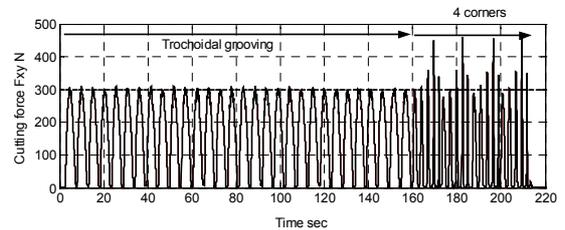


図 7 トロコイド溝加工と隅加工における切削抵抗値
 上: 送り速度一定加工,
 下: 切削抵抗一定化(送り速度制御)