

エンドミル加工における切削抵抗のシミュレーションと制御

Simulation and Control of Cutting Forces in End Milling Processes

非 坂平 昌浩 (京大工) 非 茨木 創一 (京大工)
正 松原 厚 (京大工) 正 垣野 義昭 (京大工)

Masahiro SAKAHIRA, Soichi IBARAKI, Atsushi MATSUBARA, and Yoshiaki KAKINO
Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501

This paper presents machining process simulator for 2-1/2dimensional end milling processes. From an arbitrary NC program, the simulator extracts machining conditions that are not explicitly written in the NC program, such as the depth of cut, along the entire tool path. The cutting force is then simulated over the whole path based on the prediction model, which can be easily identified by conducting a set of pre-process machining tests. Furthermore, the process simulation can be straightforwardly extended to the cutting force control. An intensive learning control method of cutting forces based on in-process updating of the simulation model is presented. The validity of the process simulation and the cutting force control method is verified in experimentation.

Key Words : End Milling, Cutting Force, Machining Process Simulator, Cutting Force Control

1. 結 論

ストレートエンドミルによる荒・中荒・中仕上げ・仕上げ加工を通して、要求精度を満足する範囲で最大限の高能率化を図るためには、加工条件の最適化が重要となる。新しい工作物材質や工具の開発が活発に進む近年では、最適加工条件のデータベースを作ることは困難である。このような観点から著者らは、切削抵抗の制御を基本として自律的に加工条件の最適化を行う、智能化工作機械の開発に取り組んできた¹⁾。切削抵抗の予測モデルに基づいた切削抵抗制御は、単純であるが高速加工条件下でも良好な制御を行うことが可能である。ただし、制御性能はモデルの予測精度に大きく影響を受けるので、信頼のおけるシミュレーターの構築が必要不可欠である。

そこで、本研究では 2-1/2 次元のエンドミル加工において、与えられた任意の工具経路データから切削抵抗をシミュレーションする切削抵抗シミュレーターを構築し、加工実験によりその性能を検証した。さらに、モデルに基づいたフィードフォワード制御手法を基礎としながら、加工中にモデルの同定を繰り返すことで学習的に制御アルゴリズムを改善する学習制御の手法を用いて、切削抵抗制御を行った。

2. 切削抵抗モデル

切削抵抗予測のための数学モデルは垣野ら²⁾の提唱した最大切りくず厚さと切削円弧長の二つの切削パラメータを決定変数とする切削抵抗モデルを用いる。エンドミルと切れ刃の幾何学的関係を示した Fig. 1 において、工具半径： r (mm)、一刃あたりの送り量： f_z (mm)、半径方向切り込み： R_d (mm)、切削関与角： A_{en} (rad)、最大切りくず厚さ： t_m (mm)、切削円弧長： L (mm)として、切削抵抗を以下の式を用いて推定する。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (1)$$

ここで、 Y は切削抵抗値を表し、 X_1, X_2 は t_m, L を正規化したものである。式(1)は、ワークの材質や工具の種類などの切削抵抗に影響を及ぼすと考えられる要素を決定因子に含まないで、加工に使われるワーク材質や工具に応じて

$0 \sim 12$ のモデル係数の同定を行う必要がある。

3. 切削抵抗シミュレーションアルゴリズム

ここでは、与えられた工具経路データから二つの切削パラメータを算出する方法について述べる。前提として、工具経路データ、すなわち工具中心軌跡と現状加工面の軌跡の情報は与えられているものとする。

工具中心軌跡の一定微小区間の点列を C 点 ($(C_x(k), C_y(k)), k=1 \dots N_c$ 、ただし N_c は点列の総数)、現状加工面軌跡の一定微小区間の点列を $preB$ 点 ($(preB_x(k), preB_y(k)), k=1 \dots N_{bp}$ 、ただし N_{bp} は点列の総数)として定義し、この軌跡上の任意の C 点に対応した切削関与角を Fig. 1 に示した A, B, C の 3 点により、幾何学的に求める。

加工面との接点である B 点は、 C 点における工具中心の運動方向と直角であり、 C 点との距離が r である。 C 点における工具中心の運動方向は、工具中心軌跡 C 点のうちの周辺 5 点で作る軌跡を、二次曲線で近似し、点列のデータから最小二乗法により係数を決定する。その曲線の C 点における方向から、 B 点 ($(B_x(k), B_y(k)), k=1 \dots N_b$ 、ただし N_b は点列の総数)が求まる。

工具と現状加工面との交点である切削点 A 点は、現状の加工面軌跡上にあり、 C 点との距離が r なので、 $preB$ 点のうち周辺 5 点で作る軌跡を先程と同様に二次曲線にカーブフィットしたものと、工具を示す円の方程式との交点として計算する。なお、連立方程式を満たす A 点が存在しない場合は、工具とワークの干渉が存在せず、エアカットの状態と判定する。

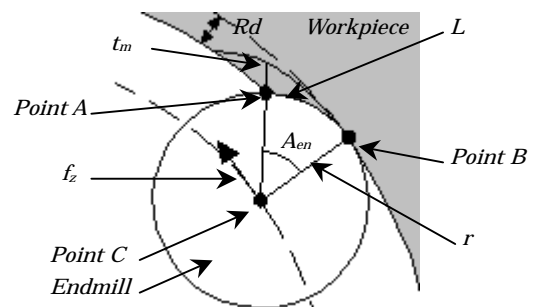


Fig. 1 Each points and cutting parameters

A点とB点が求めれば Fig. 1 の幾何学的関係から、切削角 A_{en} を求めることができる。

$$A_{en} = 2\sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(A_x(k) - B_x(k))^2 + (A_y(k) - B_y(k))^2}}{2r} \right) \quad (2)$$

また、最大切りくず厚さ t_m と切削円弧長 L は以下のように求めることができる。

$$L = rA_{en} \quad (3)$$

$$t_m = f_z \sin A_{en} \quad (4)$$

4. ケーススタディ (ポケット加工)

前節で示した手法をもとに切削抵抗シミュレーターを構築した。ケーススタディとして、Fig.2.1 に示すような 2次元ポケットを一定送り速度 500mm/min で加工した場合における切削抵抗のシミュレーションを行った。加工は、最内側のトロコイド型楕円から始まり、次に灰色部の渦巻き型楕円部分、そして濃灰色の隅加工部分と展開していく。実験条件は以下の通り。工具：(Ti,Al)N 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：5mm, 切削形態：ダウンカット, クーラント：エアブロー。実験結果は Fig.3 に示したとおりで切削抵抗のシミュレーション値と実験による測定値とがほぼ一致しており、良好な結果であるといえる。

実験による同定を前提とした切削抵抗の推定モデルである式(1)はその簡便さから、切削抵抗の制御への応用も容易である。ここでは、学習制御³⁾の手法を用いて切削抵抗の制御を行った。学習制御とは、基本的にはモデルに基づいたフィードフォワード制御であるが、単純なモデルに基づく送り速度の最適化と異なる点は、モニタリングされた切削抵抗が目標値に近づくようにモデルを更新していく点にある。加工の手順は Fig.2.2 の(a) (b) (c)と進行するが、(a)と(c)では一周ごとに、(b)では二周ごとに、モデル係数の更新を行った。実験結果を Fig.4 に示す。(a)~(c)において一周目は送り速度一定で加工を行い、二周目は一周目の結果からモデル更新を行い、切削抵抗が一定となるように送り速度を計算し、加工を行った。三周目も二周目の結果を用いて同様の加工を行ったものである。周回が進むにつれて目標切削抵抗値と測定値との誤差が徐々に小さくなる様子がわかり、切削抵抗一定化制御が行えている。

5. 結 論

2-1/2 次元のエンドミル加工において、与えられた任意の工具経路データから切削抵抗を予測する、切削抵抗シミュレーターを構築した。切削抵抗シミュレーターは、予測モデルをベースとして加工条件を最適化する、切削抵抗制御まで容易に応用することができる。ケーススタディとして、切削抵抗シミュレーターをベースとした学習制御の手法をポケット加工に適用し、良好な結果を得た。

参考文献

- 1) Tomonori Sato et al. "Proposal of Extended System Framework of Intelligent Machine Tool," 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation, vol.1, pg.15-20, Hiroshima, Japan, July2002.
- 2) 例えば 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, Vol. 66, No. 5, pp. 730-734, 2000.

- 3) Soich Ibarki, et al. "Model-based Learning Control of Cutting Forces in End Milling Processes," 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation, vol.1, pg.401-408, Hiroshima, Japan, July2002.

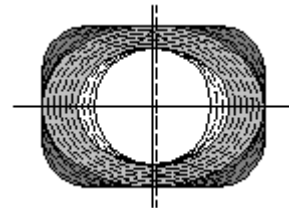


Fig.2.1 Geometry of pocket

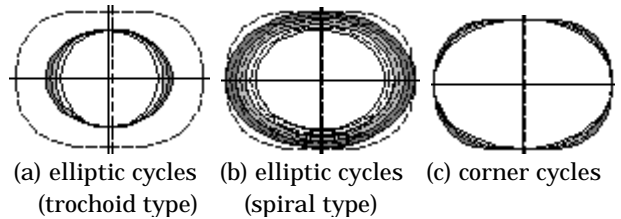


Fig.2.2 Machining procedure

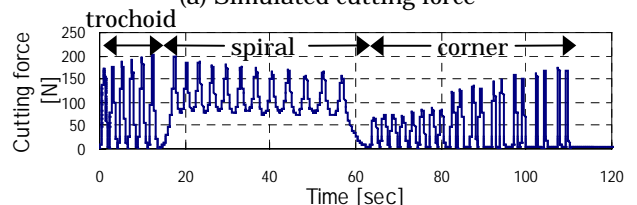
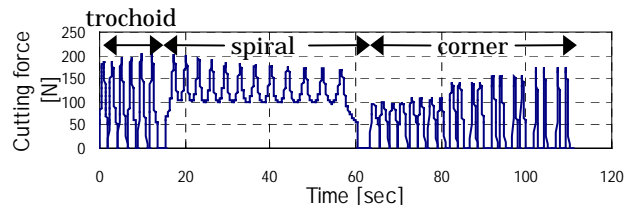


Fig.3 Simulated and Measured cutting force

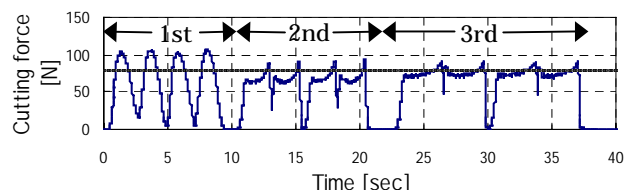
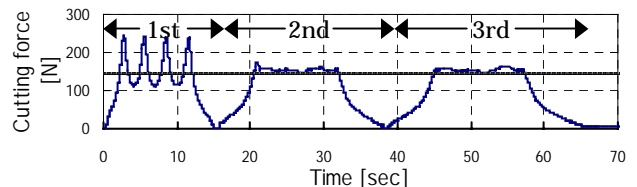
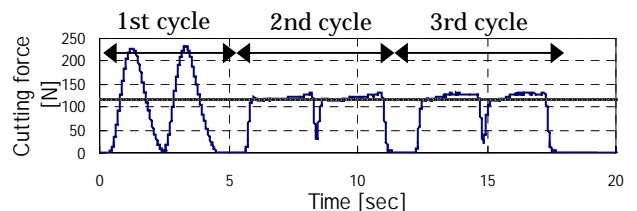


Fig.4 Measured cutting force profiles with model-based learning control system activated