切削力予測モデルに基づくフライス加工状態の認識*

(第1報, 最適化手法によるモデル内パラメータの同定と工具摩耗量の推定)

森 脇 俊 道^{*1}, 社 本 英 二^{*1}
高 大 力^{*2}, 杉 原 和 郎^{*3}

Milling State Recognition Based on Dynamic Cutting Force Model

(1st Report, Parameter Identification by Optimization Method and Estimation of Tool Wear)

Toshimichi MORIWAKI, Eiji SHAMOTO,
Dailiki KOU and Kazuo SUGIHARA

A system is proposed to recognize cutting state in end milling by comparing dynamic cutting force predicted by a mathematical model with the measured cutting force. In order to realize the recognition system, a precise cutting force model is constructed, and a method to identify the most probable parameters in the model is developed by applying the steepest descent method. The actual cutting force is measured with a piezoelectric-type dynamometer, and it is confirmed that the cutting force predicted by the model agrees with the measured one. Monitoring of tool wear is also tried by comparing the predicted force with the measured one.

Key Words: Cutting, Milling, Tool Wear, Cutting Force Model, Steepest Descent Method

1. 結 論

近年急速に進展しつつある機械加工の自動化, 高度化を推し進めていくためには, 加工状態を自ら認識し, その変動に対処できるインテリジェントな工作機械が求められる⁽¹⁾.

従来, 工具損耗, びびり振動, 過切削などによる加工状態の異常を認識するにあたって, 何らかの基準値を設定し, 測定したモータ電流⁽²⁾, 切削力⁽³⁾, AE⁽⁴⁾などがその基準値を超えるかどうかによって判断するのが一般的であった. しかし, この方法では加工条件の変化に対応することが困難であり, 汎用性に乏しい.

そこで本研究では, 加工プロセスの物理的なモデルを構築し, 加工に先立って予めその加工条件における

標準的な状態を予測する. そして加工中には, 何らかのセンサによって現在の状態を測定し, それを予測された標準的な状態と比較することによって, 加工状態の良否を判断し得るシステムを開発することを試みる.

具体的には, マシニングセンタでのエンドミル加工プロセスを取り上げる. まず, 動的な切削力を予測することのできるモデルを構築するとともに, 最適化手法(ここでは最急降下法を用いる)を適用することによって, モデル内のパラメータをエンドミル工具による実加工中の切削力測定値から簡便かつ精度良く同定することのできる手法を提案する. 実加工中の切削力測定にあたっては, 圧電型動力計を用いる. 加工に先立ち, 開発したモデルによってその加工条件における切削力を予測し, 加工中に測定される実際の切削力と比較する. ここでは, 切削力予測モデルと測定システムを利用し, 加工状態認識の一例として, エンドミル工具の摩耗状態を推定することを試みる.

2. 切削力の測定

実験には立型のマシニングセンタを使用した. 図1

* 原稿受付 平成6年9月19日.

^{*1} 正員, 神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1).

^{*2} 正員, 田辺空機機械 (〒485 小牧市川西1-1).

^{*3} 神戸大学大学院.

図1 切削力の測定方法

表1 切削条件

Tool	Diameter	20 mm
	Helical angle	30°
	Number of cutting edges	2
	Material	High speed steel (without coating)
Workpiece material		Carbon steel (JIS : S45C)
Rotational speed		300 min ⁻¹
Feed rate		60 mm/min
Axial depth of cut		6 mm
Radial depth of cut		20 mm (Slot milling)

に示すように、送りテーブルと被削材の間に圧電型動力計を固定し、エンドミル加工中の切削力を測定する。切削力信号は、エンコーダの信号を利用することにより、工具回転位置に同期してA/D変換を行い、コンピュータに取り込む。

表1に示す切削条件において、切削力を測定した結果の一例を図2に示す。ここで、工作物の送り方向はX方向である。横軸の θ は、エンドミル工具の2枚刃の内の片方の底の刃先が、Y軸のマイナス側を横切る瞬間をゼロとする工具の回転角度である(図3参照)。測定は、工具が16回転する間継続して行った。図2の各工具回転位置における切削力値は、工具が同じ回転位置にあるときの16個のデータを平均したものである。図中の三本の切削力曲線は、工具が摩耗するに伴って切削力が増加する様子を示している。ただしここでは、工具摩耗量として刃先部の逃げ面摩耗幅を用いた。

3. 切削力の予測方法

3.1 切削力予測モデル 図4に示すように、エンドミル工具の切れ刃に沿って切削領域を分割し、切削

(a) X方向成分

(b) Y方向成分

図2 切削力測定結果

図3 切削力の各方向成分および切取り厚さ

力は各微小領域で生ずる微小切削力の重ね合わせによって求まるものとする。また各切削力は切削断面積と比切削抵抗の積によって求まり、比切削抵抗は切取り厚さによって変化する、すなわち寸法効果が存在するものとする。以上のように、従来から比較的良好に用いられている仮定(例えば文献(5))を採用し、次式によって微小切削力の円周方向成分 ΔF_t 及び半径方向成分 ΔF_r を算出する。

$$\begin{aligned} \Delta F_t &= K_t(C_t) \cdot C_t \cdot D_z \\ \Delta F_r &= K_r(C_t) \cdot \Delta F_t \end{aligned} \quad \dots(1)$$

ここで、 $K_t(C_t)$ は主分力の比切削抵抗、 $K_r(C_t)$ は切削

図4 切削力予測モデル

分力比, C_t は切取り厚さ, D_z は微小切削領域の軸方向高さである。

これらの微小切削力は, 次式によりマシニングセンタのX方向成分 ΔF_x 及びY方向成分 ΔF_y に変換することができる(図3参照)。

$$\begin{aligned}\Delta F_x &= \Delta F_t \cdot \cos \phi + \Delta F_r \cdot \sin \phi \\ \Delta F_y &= \Delta F_t \cdot \sin \phi - \Delta F_r \cdot \cos \phi\end{aligned}\quad \dots(2)$$

ここで, ϕ は着目している切削領域がY軸のマイナス側を横切る瞬間をゼロとする回転位置である。

さらに切削を行っている領域全てのX方向成分, Y方向成分の微小切削力を足し合わせることで, 以下のようX方向, Y方向の切削力 F_x, F_y が求められる。

$$\begin{aligned}F_x &= \sum \Delta F_x \\ F_y &= \sum \Delta F_y\end{aligned}\quad \dots(3)$$

3.2 切取り厚さの算出 従来, 切取り厚さは, 近似式⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いて算出されることが一般的であったが, 本研究では, 次のようにコンピュータ上で数値的に求める手法を開発した。

図3に示すように, まず, 回転数, 回転半径, 送り速度から1つの刃先の軌跡を1回転分シミュレートし, コンピュータのメモリに加工面形状として格納する。そして, 次の刃先の軌跡をシミュレートし, その刃先と回転中心を結ぶ線分と前加工面形状との交点を計算する。この交点が存在すれば, 刃先からその交点までの距離として切取り厚さを求める。この時同時に, メモリ内の加工面形状を新しい値に更新する。以上の計算を工具の刃数分繰り返し, 各刃先ごとに切取り厚さ

図5 切取り厚さの計算結果

を算出する。本手法では, 従来の近似式を用いる手法と比べて, 切取り厚さが小さくなる時にも大きな誤差を生じることがなく, また将来的に工具の形状誤差, 取付誤差などを考慮して正確な計算を行うことも容易であると考えられる。

本手法による計算結果の一例を図5に示す。図に示すように切取り厚さの曲線に幅があるのは, 切れ刃がねじれているために, 刃先位置によって切取り厚さが異なるためである(図4参照)。なお図5は, 表1に示す切削条件で溝加工を行った場合の計算結果である。

3.3 比切削抵抗の導出 主分力の比切削抵抗 K_t , 切削分力比 K_r は, 被削材の材質によってほぼ一定であるとして取り扱われることがあるが, 実際には切取り厚さ, 工具の形状, 材質, 摩耗量, 切削速度, 切削油等による影響も大きいと考えられる。最終的には, これらすべての要因による影響を定量的に明らかにすることが必要であるが, ここでは切取り厚さと工具の摩耗状態による影響について取り扱い, 簡便かつ高精度に比切削抵抗 K_t , 切削分力比 K_r を求める手法を提案する。なお, 将来のインテリジェント工作機械においては, 実稼働中の切削力測定値を利用してモデル内パラメータの学習を行うことが望まれる。このため本研究では, 比切削抵抗導出にあたって, 特別な予備実験を行うのではなく, その工具による実加工中の切削力測定値を利用することを前提とする。

まず初めに, ある工具摩耗状態における比切削抵抗 K_t 及び切削分力比 K_r を切取り厚さ C_t の関数として求める方法について述べる。本手法では, 一つの切削条件で測定した切削力(例えば図2に示す一本の切削力曲線)のみから, あらゆる切取り厚さ C_t における比切削抵抗 K_t 及び切削分力比 K_r を求めることができる。

基本的には, 比切削抵抗は図2に示す切削力測定値を図5に示す切取り厚さで割った値と考えられる。ところが切削中の切取り厚さは, 図5に示すように常に幅を持つため, C_t と K_t, K_r の関係を直接求めるために

図6 比切削抵抗の算出方法

は、例えば切取り厚さ C_t の値として平均値を用いることになる⁽⁷⁾。しかし、このようにして K_t , K_r を求めることは、 C_t の関数として考えていることに矛盾し、不正確である。そこで最適化手法、具体的には最急降下法を用いて、以下のように比切削抵抗及び切削分力比を求める手法を考案した。

まず、比切削抵抗を切取り厚さの指数関数として(4)式のように仮定し、式中のパラメータ $A_1 \sim A_6$ の初期値を、図6に示すようにランダムに決定する。

$$\begin{aligned} K_t(C_t) &= A_1 \cdot C_t^{-A_2} + A_3 \\ K_r(C_t) &= A_4 \cdot C_t^{-A_5} + A_6 \end{aligned} \quad \cdots(4)$$

従来は、式中の A_3 , A_6 の項を省いた形でモデル化することが一般的であった⁽⁸⁾。しかし、寸法効果の性質を考慮すれば、工具刃先丸み等の影響が無視できる $C_t = \infty$ において、 K_t , K_r はある大きさを持った値に収束すると考えられる。そこで本研究では、 A_3 , A_6 の項を付加する。また A_1 , A_2 , A_4 , A_5 は、寸法効果の度合を表す係数と考えられる。

次に、上述の切削力予測モデルとパラメータ $A_1 \sim A_6$ を用いて、各工具回転位置における切削力を計算する。この計算値と図2に示す測定値との誤差の二乗和を、工具回転位置に関して積算する。その積算値が十分に小さければ計算を終了し、そうでなければ誤差の積算値を各パラメータで数値的に偏微分することにより、その最急降下方向を求める。そして各パラメータの値を最急降下方向に微小ステップ修正し、再度切削力の

(a) 比切削抵抗

(b) 切削分力比

図7 比切削抵抗と切削分力比の算出方法

計算、誤差の積算を行う。以上の計算を図6に示すように、誤差が十分に小さくなるまで繰り返すことにより、パラメータ $A_1 \sim A_6$ の最も確からしい値を求める。

以上に述べた手法は、ある一つの工具摩耗状態における算出方法であるが、これをさらに次に述べるように拡張し、種々の工具摩耗状態における比切削抵抗を同時に求める。

工具が摩耗すると比切削抵抗値が増加するが、この傾向は小さな切取り厚さにおける値ほど顕著であり、摩耗量を無視できる程大きな切取り厚さにおいては摩耗量の影響はないと考えられる。すなわち、(4)式における A_3 , A_6 の値は、工具が摩耗しても変化しないものと考えられる。そこで各種の工具摩耗状態における切削力測定値と計算値との誤差の二乗和の総和が最小になるように、図6に示した手法と同様にして、各摩耗状態における A_1 , A_2 , A_4 , A_5 の値と、摩耗状態に影響されない A_3 , A_6 の最適値を同時に求める。

以上の方法により、図2に示す三種類の工具摩耗状態における比切削抵抗 $K_t(C_t)$ 、切削分力比 $K_r(C_t)$ を同時に求めた結果を図7に示す。図のように、 K_t , K_r は C_t に対して顕著な寸法効果を示している。

なおこの最適化を繰り返す際に、誤差総和は図8に

図8 誤差の総和

示すように減少し収束した。この最適化の終了時における切削力の計算値と測定値を図9に示す。終了時における計算値と測定値の誤差は、図に示すように小さくなっている。

(a) X方向成分 (Wf:0mm)

(b) Y方向成分 (Wf:0mm)

(c) X方向成分 (Wf:0.36mm)

(d) Y方向成分 (Wf:0.36mm)

(e) X方向成分 (Wf:0.57mm)

(f) Y方向成分 (Wf:0.57mm)

図9 最適化終了時における切削力の計算値と測定値 (送り速度:60mm/min)

4. 切削力の予測結果と加工状態の認識

前章で述べた切削力予測モデル、切取り厚さ、及び比切削抵抗 K_t と切削分力比 K_r を用いて、切削力の予測を行った。その予測例を図10に示す。図10は、図9の場合に比べて送り速度を半分にした切削実験における予測結果である。図のように、送り速度が変化しても精度良く切削力を予測し得ている。本研究では、以上の手法によって切削力を予測し、実切削中に動力計によって測定される切削力と比較することにより、種々の加工状態（工具摩耗、工具欠損、びびり振動、過切削など）の認識を行うことを目指している。ここではその一例として、送り速度 30 mm/min で切削して

(a) X方向成分 (Wf:0mm)

(b) Y方向成分 (Wf:0mm)

(c) X方向成分 (Wf:0.36mm)

(d) Y方向成分 (Wf:0.36mm)

(e) X方向成分 (Wf:0.57mm)

(f) Y方向成分 (Wf:0.57mm)

図10 切削力の予測値と測定値 (送り速度: 30mm/min)

いる時の工具摩耗量を, 送り速度 60 mm/min の時のデータを基に構築した切削力予測モデルを用いて認識することを試みた。

その方法は, 各工具摩耗量に対応する最大切削力 F_{max} (切削力のX方向成分 F_x とY方向成分 F_y の合力 F の最大値) をモデルにより予測し, そのデータ間を直線近似した後, 測定された最大切削力に対応する工具摩耗量を求めるという単純なものである。図11に, 計算によって予測した最大切削力と工具摩耗量の関係を示す。

上述の関係を用い, 最大切削力の測定値から図11に示すように工具摩耗量を推定した結果, 推定値と測

図11 工具摩耗量と最大切削力の関係

表2 工具刃先逃げ面摩耗幅の推定結果と測定値

Estimated width	0.10 mm	0.41 mm	0.70 mm
Measured width	0.00 mm	0.36 mm	0.57 mm

定値とは、表2に示すように比較的良い一致を示した。

5. 結 論

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) エンドミル加工において、一つの切削条件で測定した切削力データから、切取り厚さと工具摩耗量を考慮した比切削抵抗を算出する手法を考案した。
- (2) 求められた比切削抵抗を用いて切削力を予測するモデルを構築し、実際に精度良く切削力を予測できることを確認した。
- (3) 上述のモデルによって切削力を予測し、動力計による測定値と比較することにより、比較的精度良く工具摩耗量を推定し得ることを確認した。

おわりに、本実験を遂行する上で御援助を賜った(株)神戸製鋼所工具事業部の皆様に感謝の意を表します。なお本研究は、IMS共同研究プログラムの一貫として行われたものであることを付記しておく。

参 考 文 献

- (1) 森脇俊道, 工作機械のインテリジェント化, 日本機械学会誌, 96巻, 901号(1993), 1010.
- (2) Y. Altintas, Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 114 (1992), 531.
- (3) J. Tlustý, Sensing Cutter Breakage in Milling, Annals of the CIRP, 37-1(1989), 45.
- (4) 森脇俊道, 樋野 励, AEを用いたコーティング工具の寿命検出に関する研究, 精密工学会誌, 57巻, 7号(1991-7), 1235.
- (5) W. A. Kline, et al. The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application to Cornering Cuts, Int. J. Mach Tool Des. Res., 22-1(1982), 7.
- (6) J. Tlustý and S. Smith, An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 113(1991), 169.
- (7) Y. Altintas and A. Spence, End Milling Force Algorithms for CAD Systems, Annals of the CIRP, 40-1(1991), 31.
- (8) F. M. Kolarits and W. R. DeVries, A Mechanistic Dynamic Model of End Milling for Process Controller Simulation, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 113 (1991), 176.