506 切削力モデルに基づくエンドミル加工状態監視に関する研究

Study on Endmilling Condition Monitoring Based on Cutting Force Model

正 社本英二 (神戸大) 〇学 梅崎雅之 (神戸大)
正 樋野 励 (神戸大) 正 森脇俊道 (神戸大)

Eiji SHAMOTO, Kobe University, Rokkodai 1-1, Nada, Kobe
Masayuki UMESAKI, Kobe University, Rei HINO, Kobe University
Toshimichi MORIWAKI, Kobe University

A new method is proposed in the present research to monitor tool wear of endmills by comparing measured cutting force with calculated one. A new cutting force model is developed to correlate the milling force with the tool wear, and cutting experiments are carried out by utilizing a vertical machining center. Variables in the cutting force model are identified so that the calculated milling force is best fitted with the measured one. It is clarified by the experiments and the identifications that there is a good correlation between the tool wear and the identified variables. Unlike the conventional monitoring methods, the present method based on the cutting force model is expected to be able to monitor the tool wear without utilizing any databases.

Key words: monitoring, milling process, cutting force model, tool wear

1. 緒 言

機械加工の高度化, 自動化を進めるためには, まず加工プロセスを自動的に認識する技術を開発することが必要である。そこで, 本研究では, 代表的な機械加工であるエンドミル加工を取り上げ, 切削力モデルに基づく工具摩耗状態監視システムを開発することを試みる。本報では, まず本手法の基礎となる切削力モデルを構築し, その有効性を実証する。そして, そのモデルに基づいて工具摩耗を推定し得ることを示す。

2. 切削力モデルの構築

切削による工具状態 (摩耗量や偏心量) の変化は切削力に影響を及ぼす。そこで, 加工中に測定される切削力をもとに工具状態の監視を行うことを目的とし, ここではその基礎となる切削力モデルを構築する。

比切削抵抗の変化 (寸法効果) が指数関数で表されると仮定し, 式 (1), (2) のように切削力の円周方向成分 (主分力) F_t , 及び半径方向成分 (背分力) F_r を切り取り厚さ C_t の関数として表す。

$$F_t = \{F_{et} + K_t \cdot C_t \cdot (1 + A_{1t} \cdot \exp(-C_t/A_{2t}))\} \cdot Dz \quad (1)$$

$$F_r = \{F_{er} + K_r \cdot C_t \cdot (1 + A_{1r} \cdot \exp(-C_t/A_{2r}))\} \cdot Dz \quad (2)$$

ここで K_t, K_r は切り取り厚さが無限大のときの比切削抵抗を表し, 被削材の硬さや工具形状などの影響を受ける。 F_{et}, F_{er} はエッジフォースと呼ばれる刃先に働く切削力を表し, 刃先の摩耗量や被削材の硬さに影響を受ける。また, A_{2t}, A_{2r} は摩耗量を表す係数, A_{1t}, A_{1r} は摩耗の形態を表す補正係数であって摩耗量には影響されないと考えられる。本モデル式は図 1 に示すように切り取り厚さ C_t 及び刃先丸みがともに n 倍になると, 切削力とエッジフォースが n 倍になるという相似則を満たす。 Dz は切削幅である。

このモデル式は, 図 2 (a) に示すように, 切り取り厚さが微小な領域で丸みを帯びた切削力を算出する。刃先丸みが大きくなると, 図 2 (b) に示すように切り取り厚さが微小な領域での丸みが大きくなりかつエッジフォースも大きくなる。またこのモデル式は相似則を満たしているので図 2 (b) の 2 つの刃先丸みの異なる切削力のグラフは原点を中心に拡

大したものになる。

以上より, モデル式内パラメータ $F_{et}(F_{er})$ を $K_t(K_r)$ で除することにより, 被削材の硬さの影響が消去され, この値を利用することにより刃先丸みを推定し得るものと考えられる。また, A_{2t}, A_{2r} の値を参照することによっても, 刃先丸みを推定し得る可能性がある。

Fig.1 Cutting process

(a) Calculated cutting force and variables in model

(b) Change by roundness of cutting edge

Fig.2 Relationship between chip thickness and principal cutting force

3. 実験方法

前章で構築した切削力モデルの有効性を調べるため, あらかじめ刃先に丸みをつけたスローアウェイチップを取り付けたエンドミルを用い, 図 3 に示すように加工実験を行った。図のように, 動力計の上に板状の被削材を固定し, エ

ンドミルの側刃のみで加工を行った。主な加工条件を表 1 に示す。また、今回は切削油剤を用いた湿式により加工を行った。

Fig.3 Schematic illustration of experimental setup

Table 1 Cutting conditions

刃先丸み	12.5, 78.8, 103, 188 μm
主軸回転数	400 min^{-1}
送り速度	160mm/min
工具直径	25mm
軸方向切込み	2mm
被削材	ジュラルミン

Fig.4 Comparison between measured and fitted forces

4. 実験結果および考察

4.1 切削力モデル内パラメータの同定結果

前章で述べた切削力モデルを用いて切削力の同定を行った。同定結果を図 4 に示す。本同定においては、まず工具回転角度を自動的に認識し、その後最急降下法を用いて切削力推定値が測定値に最も一致するように、モデル内パラメータを同定している。図に示されるように構築した切削力モデルによる計算値は測定値によく一致しており、各パラメータについても精度良く同定できているものと推察される。

4.2 工具摩耗と切削力モデル内パラメータ

本モデル式内のパラメータを同定し、工具の刃先丸みに伴うエッジフォース F_e の変化を算出した。しかし、エッジフォース F_e は刃先丸みのみならず、被削材の硬さの影響も受ける。そこで、エッジフォース F_e を比切削抵抗 K_t で除することにより被削材の硬さの影響を消去する。図 5 に F_e/K_t と刃先丸みの関係を示す。図より F_e/K_t の値は刃先丸みと良い相関があることがわかる。したがって、 F_e/K_t の値を用いることによって、刃先丸みすなわち工具摩耗量を推定し得るものと考えられる。

次にパラメータ A_{2t} と刃先丸みの関係について検討する。エッジフォースを用いたときと同様に、モデル内のパラメータを同定し、工具の刃先丸みに伴うパラメータ A_{2t} の変化を算出した。パラメータ A_{2t} と刃先丸みの関係を図 6 に示す。モデル式ではパラメータ A_{2t} は刃先丸みに比例するはずであるが、あまり良い比例関係があるとは言えない。

以上より、前述した 2 つの手法のいずれか、あるいは両方を用い、切削力の測定値から同定されるパラメータの値を参照することにより、刃先丸みを推定できるものと考えられる。

Fig.5 Relationship between roundness cutting edge and parameter F_e/K_t

Fig.6 Relationship between roundness cutting edge and parameter A_{2t}

5. 結 言

本研究では、フライス加工における加工状態監視を目的として、切削力モデルの構築および工具摩耗量監視手法の開発を試みた。本研究で得られたおもな成果を以下にまとめる。

- (1) 刃先丸みを考慮し、相似則を満たす切削力モデルを構築した。
- (2) 切削力モデル式内パラメータと工具刃先丸みの関係を明らかにし、これらのパラメータをもとに工具摩耗量の推定を行い得る可能性を示した。