

エンドミル加工における工具寿命の制御に関する研究

Study on control of Tool Life in End Milling Processes

○学 清水 拓也 (京大), 正 茨木 創一 (京大), 正 松原 厚 (京大)

Takuya SHIMIZU, Soichi IBARAKI, Atsushi MATSUBARA, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto

In order to perform high speed machining, it is important to develop a support system that can monitor the machining process, and optimize machining conditions adaptively. In this research, we propose a long-term monitoring scheme of the tool wear and a cutting force control strategy. First, the cutting force is monitored only at every “check point” set on the tool path. The federate profile is updated at every check point, such that the desired cutting distance can be machined before reaching the end of tool life. The effectiveness of the present approach is experimentally investigated by cutting experiments.

Keywords: end milling, tool wear, tool life, intelligent machining

1. 緒言

(Al,Ti)N コーテッド超硬エンドミルを用いた高硬度焼入れ金型鋼の加工の知能化を目的とした知能化工作機械開発のための研究¹⁾では, 加工中に発生する切削抵抗に注目し, 切削抵抗を目標値以下に制御する研究が行われてきた. 切削抵抗の制御という形で, 加工条件の自律的最適化を行う研究は, 60年代に提案され, これまでに非常に盛んに研究されてきた. しかし, これらの研究成果が実用化された例は極めて少なく, その多くが適応制御理論の応用例という域を出なかった. 切削抵抗のフィードバック制御手法の実用例が少ない原因として, 切削抵抗をモニタリングするための方法の信頼性とコストが挙げられる. また, より単純な, フィードバックを用いないモデルベースの送り速度スケジューリング法と比較して, その実用的効果が十分議論されてこなかった.

本研究では, 工具寿命に至るまでに切削距離の目標値を安全に加工でき, 可能な限り加工能率を向上させることを目的として, フィードバック制御と送り速度スケジューリング法を組み合わせた, 機械加工プロセスの新しい制御手法を提案する. 具体的な方法として, 切削抵抗を工具経路中に設置した「チェックポイント」でのみ限定的にモニタリングをする. チェックポイントで測定された切削抵抗から工具摩耗の進行度の指標 (工具摩耗指標) を推定し, これにより工具摩耗の進行度を判断する. 工具寿命に達するまでに切削距離の目標値を安全に加工することを目的として, 送り速度の制御を行う. なお, 本研究では(Al, Ti)N コーテッド超硬エンドミルを用いた, 高硬度焼入れ金型鋼の荒加工を対象とする.

2. 工具摩耗の進行度の推定

2.1 工具摩耗指標の算出

一般に, 工具摩耗の進行にともない, 工具に作用する切削抵抗は増大していくことはよく知られている. しかし, 切削抵抗は加工形状や加工条件によって変動するため, 単純に切削抵抗をモニタリングするだけでは, 工具摩耗の進行度は判定できない. 最初に, 本節では切削抵抗から工具摩耗の進行度を推定するための手法を提案する.

工具摩耗指標は大塚ら²⁾の提案した切削抵抗予測式(式(1))から推定する.

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

ただし, Y は切削抵抗の予測値, X_1 , X_2 はそれぞれ変形前最大切りくず厚さと切削関与長を正規化したものである. 係数 $\beta_0 \sim \beta_{12}$ の初期値はモデル同定試験により求める. 式(1)において, 工具摩耗の進行度にもなう加工プロセスの変化は, 係数 β_0 に最も大きく現れ, その他の係数 $\beta_1 \sim \beta_{12}$ に与える影響は比較的小さい. したがって, チェックポイントごとに測定された切削抵抗と, 加工条件から定まる X_1 , X_2 の値を用いて, 係数 β_0 を同定することで, 工具摩耗の進行度を推定することができる考えた.

工具摩耗指標 $\hat{\beta}_0$ は, 各チェックポイントで測定された切削抵抗から, 式(2)により求める. ただし, X_1 , X_2 は既知であり, $\beta_1 \sim \beta_{12}$ は常に一定の値とする.

$$\hat{\beta}_0(x) = F(x) - (\beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_{11} \cdot X_1^2 + \beta_{22} \cdot X_2^2 + \beta_{12} \cdot X_1 \cdot X_2) \quad (2)$$

2.2 検証実験

工具摩耗指標による工具摩耗の進行度の推定の有効性を, 簡単な直線切削試験により検証した. 新品工具からスタートして, 同一条件で直線パスによる側面切削を続け, 一定切削距離毎に加工時の切削抵抗を動力計を用いて測定する. 以上の直線切削を工具寿命に達するまで行う. 測定された切削抵抗から, 2.1節の方法により工具摩耗指標を算出する. 表1に共通実験条件を示す. 表2に加工条件を示す. C1~C5の計5つの条件で実験を行った.

Table1 Experimental conditions

Machine	Vertical machining center
Tool	(Al,Ti)N coated sintered carbide radius end mill, $\phi 6$, 6 flutes
Workpiece	SKD61 (HRC53)
Coolant	Oil mist
Cutting direction	Down cut
Tool extension	18 mm
Axis depth of cut	6 mm

Table 2 Machining conditions in tool wear tests

Name	Spindle speed, min ⁻¹	Radial depth of cut, mm	Feedrate, mm/tooth
C1	16,000	0.3	0.120
C2	16,000	0.5	0.080
C3	8,000	0.3	0.060
C4	8,000	0.3	0.079
C5	8,000	0.4	0.060

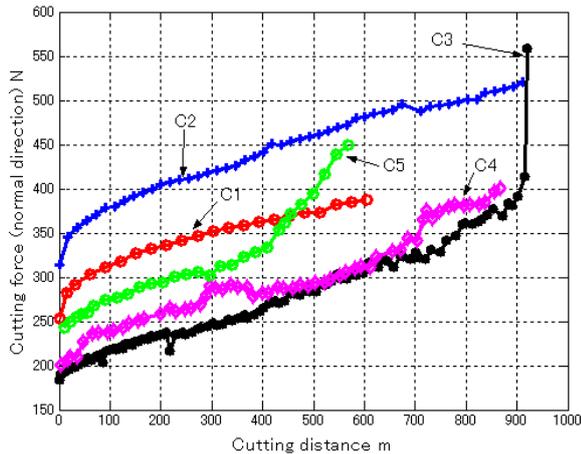


Fig.1 Measured cutting forces until the end of tool life

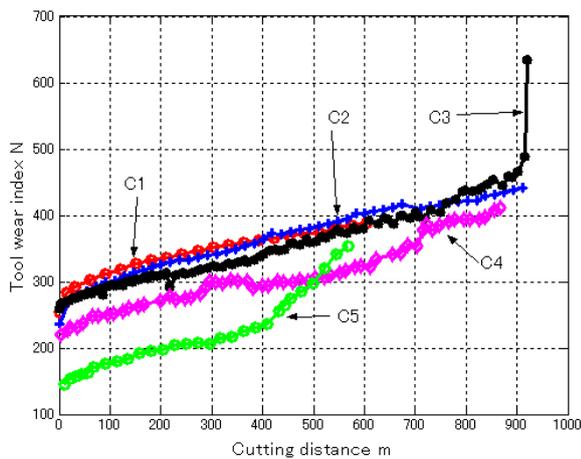


Fig.2 Estimated tool wear indices $\hat{\beta}_0$

図 1 に動力計で測定された切削抵抗の推移を示す。同図から各条件により切削抵抗に大きな違いが見られることがわかる。また、工具寿命時の切削抵抗値は 200N 程度の差がある。図 2 に提案した工具摩耗指標の推移を示す。同図から条件の違いによる切削抵抗の差は小さくなり、工具寿命時の切削抵抗値は 100N 程度の差となった。したがって、工具摩耗指標を導入することによって、加工条件が異なっても共通して工具摩耗の進行度の判定を容易に行えるといえる。

3. 送り速度変更による工具寿命の制御

3.1 送り速度の更新方法

工具寿命に達する前に切削距離の目標値を加工でき、かつ可能な限り加工時間を短縮できるようにすることを目的として、チェックポイント毎に送り速度の修正を行

う手法を提案する。各チェックポイントでは、最初に与えられた切削距離の目標値から切削抵抗の目標値を設定する。工具寿命にいたる切削抵抗の大きさが既知であると仮定し、測定された切削抵抗から傾きを一次近似し工具寿命の予測を行う。予測された工具寿命が切削距離の目標値より短い場合、新たに切削抵抗の上昇率を計算し、各チェックポイントでの切削抵抗の目標値を与える。各チェックポイントで、式(1)中の β_0 を工具摩耗指標 $\hat{\beta}_0$ に置き換え、式(1)から次のチェックポイントまでの送り速度を算出し、送り速度を変更する。

3.2 直線切削による検証実験

実験条件は表 1 と同様である。条件 1、条件 2 での切削距離の目標値はそれぞれ 1000m, 400m である。両条件共に、初期の加工条件は表 2 の C1 と同様である。各チェックポイントで送り速度の更新を行う。

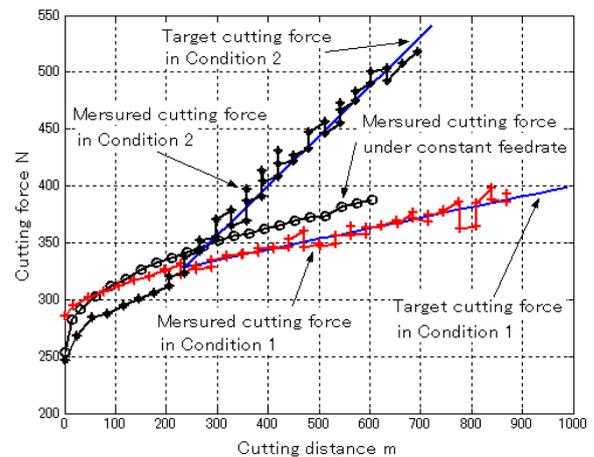


Fig.3 Measured cutting forces with and without control

図 3 は送り速度制御を行い加工した場合の測定された切削抵抗の推移を示している。制御を行わず初期加工条件で加工を続けた結果も比較のために示している。制御を行わない場合、切削距離 619.4m、加工能率 20.7cc/min であった。条件 1, 2 は送り速度制御を行った場合を示し、条件 1 では切削距離 875.9m の加工が行え、加工能率 19.2cc/min であり、加工能率の維持が図れた。条件 2 では切削距離 695.2m の加工が行え、加工能率が 25.6cc/min であり、加工能率の向上が図れた。最大誤差 22N で切削抵抗の制御が行えた。

4. 結言

本研究では、工具摩耗の進行によるプロセス変化を推定するための工具摩耗指標を提案し、摩耗試験により工具摩耗指標の有効性を示した。加工開始から終了までの長期間の切削抵抗制御の手法を提案し、その有効性を示した。今後、これらの基礎実験の結果を基に、より実用的な金型加工などへの適用を進めて行く予定である。

参考文献

- 1) 垣野義昭：工作機械の高速化・知能化，第 2 回生産加工・工作機械部門講演会公演論文集，No.2000-2，(2000)，pp.1-4.
- 2) 垣野，大塚，中川，廣垣，佐々木：焼入鋼のエンドミル加工に関する研究(第 1 報)，精密工学会誌，Vol.66，No.5，(2000)，pp.730-734.

抄録

エンドミル加工の加工条件の自律的決定の一手法として、切削抵抗を制御するための手法の開発は多く報告されている。しかし、切削抵抗のフィードバック制御法は主に切削抵抗モニタリングの信頼性とコスト面から実用化された例は極めて少ない。そこで、工具寿命に至るまでに切削距離の目標値を安全に加工でき、可能な限り加工能率を向上させることを目的として、フィードバック制御と送り速度スケジューリング法を組み合わせた、機械加工プロセスの新しい制御手法を提案する。