

# エンドミル加工の固定サイクルにおける 工具パスの自律的最適化に関する研究

## An autonomous optimization of tool paths in canned cycles for end milling

正 茨木 創一 (京大工) 非 前田 大輔 (京大工) 正 松原 厚 (京大工)  
正 垣野 義昭 (垣野技術研究所) ○非 安田 朋広 (京大工)

Soichi IBARAKI<sup>1</sup>, Daisuke MAEDA<sup>1</sup>, Atsushi MATSUBARA<sup>1</sup>, Yoshiaki KAKINO<sup>2</sup>, and Tomohiro YASUDA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501

<sup>2</sup>Kakino Research Institute, Nakagyo-ku, Kyoto

In order to perform a high-productivity manufacturing by fully utilizing the potential of today's high-speed machining centers, it is important for a manufacturing system that can autonomously determine machining conditions in an intelligent manner. This paper presents the implementation of an autonomous machining process monitoring scheme and an in-process optimization scheme of tool paths and machining conditions into canned milling cycles. Since a tool path is simple, repetitive, and known in such a canned milling cycle, the implementation of such an in-process control scheme is more practical compared to the case under an arbitrary tool path. This paper particularly considers a trochoidal grooving canned cycle as an example.

**Key Words:** end milling, canned cycles, machining process monitoring, machining process control, cutting force.

### 1. 緒言

ドリル加工やタップ加工においては、プログラミング作業の簡便化と、NCプログラムの短縮化のために、従来からしばしば固定サイクルを用いて加工が行われてきた。一方、エンドミル加工は加工方法の自由度が高いため、通常CAMシステムにより算出された加工パスが用いられる。しかし、穴形状の加工や溝加工など加工パスのパターン化が可能な単純な加工フィーチャを対象とし、エンドミル加工用の固定サイクルを装備するCNCは近年増加している。エンドミル加工用の固定サイクルは、加工工程を単純な形状を持つ加工フィーチャの組み合わせとして定義するフィーチャベースの工程設計法において基礎的な役割を果たすものであり[1]、フィーチャベースの工程設計は、STEPなどのモデル記述プロトコルとも対応している。しかし現状では、エンドミル加工用の固定サイクルを有効に活用し工程設計を行っている例は極めて稀である。

非熟練作業者が高速マシニングセンタの能力を十分に活用し、実際に高能率な加工を行うためには、切削条件などの自動設定や、オンラインでの加工条件の適応制御を自律的に行う生産システムが必要不可欠である[2]。このような観点から、加工状態を表すパラメータとして特に切削抵抗に着目し、その制御という形で最適な加工条件を自律的に決定する手法は'80年代以降多くの研究がなされてきた。しかし、このような手法の実装のためには、切削抵抗のモニタリング精度や工程設計の複雑さなど実用上問題が多く、実用化された例は殆どない。

本論文では、切削抵抗のモニタリングと、それに基づき加工条件及び工具パスをインプロセス制御する手法を、固定サイクルを対象として実装する手法を提案する。

### 2. 固定サイクルにおける工具パスの自律的最適化

#### 2-1 対象とする固定サイクルとアルゴリズムの概要

固定サイクルでは工具パスがパターン化され既知であるため、動力計などの外部センサを用いることなく加工中の切削抵抗をモニタリングすることが比較的容易である。また、固定サイクル内部での加工パスの設計は自由度が高いため、加工パスを適応的に修正することも、任意の工具パスの場合と比較するとはるかに実用的であると言える。本論文では例

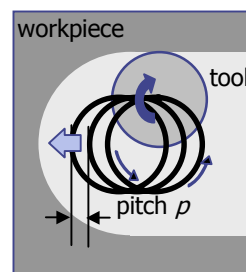


Fig. 1 Schematics of trochoidal grooving cycles

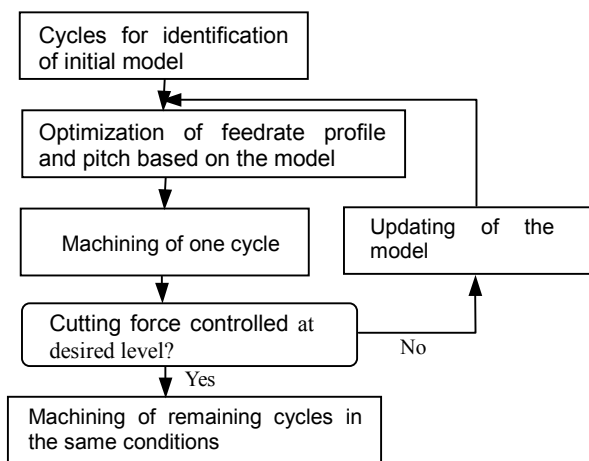


Fig. 2 Flow chart of learning steps in canned cycles

として、図1に示すようなトロコイド溝加工サイクルを取り上げる。

図2に提案する手法の概略を示す。以下にその詳細を示す。

#### 2-2 切削抵抗のモニタリング

本手法では、加工中の切削抵抗はサーボモータの電機子電流から推定する。一般に、摺動面、ボールねじなどの摩擦の影響を正確に推定するのは困難であることから、各サイクル内で刻々変化する切削抵抗を逐次モニタリングすることは

容易ではない[3]. ここでは、予め同一の工具パスを用いて空送りしたときのサーボモータ電流を測定しておくことにより摩擦の影響を保存しておく、また各サイクルにおける切削抵抗の最大値のみをモニタリングの対象とする。固定サイクルのように加工パスがパターン化された条件では、このような手法により十分な精度が得られると判断した。

### 2-3 切削抵抗予測モデルの学習的同一化

本論文では送り速度及び工具経路の最適化のために、垣野ら[4]が提案した切削抵抗予測モデルを用いる。このモデルは変形前切りくず厚さ  $t_m$ 、及び切削円弧長  $L$  という工具と加工面の幾何的干渉から定義される2つのパラメータを説明変数とした2次元応答曲面モデルで、工具とワーク材質の組み合わせに応じて6つの係数を実験的に同一化する必要がある。固定サイクル内では、工具と加工面の幾何的干渉が既知であるため、各サイクルにおける切削抵抗の最大値から、最小2乗法によりこれらの係数を学習的に更新することができる。

### 2-4 工具パス及び送り速度のインプロセスでの最適化

固定サイクル内に与えられたチェックポイント毎に、切削抵抗予測モデルに基づき、工具経路及び送り速度を以下の規範に基づき最適化を行う。

- 1) 各サイクルの切削抵抗の予測最大値が、与えられた目標値  $F_{target}$  以上とにならない範囲で、工具経路のピッチ  $p$  を最大化する。
- 2) 各サイクルにおいて切削抵抗の予測値が目標値  $F_{target}$  に一定化されるように、送り速度を決定する[4]。

切削抵抗予測モデルと、ピッチ及び送り速度の更新を一定間隔毎に繰り返すことにより、学習的に最適値に到達する。

## 3. ケーススタディ

提案した手法の有効性を加工実験により検証した。主な加工条件は以下の通り。工作機械：小型立型マシニングセンタ、工具：(Ti, Al)N コーテッド超硬ストレートエンドミル、 $\phi 10\text{mm}$ 、4枚刃、主軸回転数： $2800\text{ min}^{-1}$ 、切削形態：ダウンカット、クーラント：オイルミスト。

初めに、切削抵抗予測のための初期モデルを得るため、工具経路のピッチ  $p$  及び送り速度  $F$  の組み合わせを10通りに変化させ加工を行った[5]。ただし、送り速度は各サイクル内で一定とした。図3に切削抵抗のモニタリング値を示す。サーボモータ電流による切削抵抗モニタリングの精度を示すため、動力計による切削抵抗の測定値も同時に示す。

初期モデルから開始し、1サイクル毎にモデル更新と送り速度及びピッチの最適化を行った。3回の学習を行ったとき、各々のサイクルにおける切削抵抗を、動力計を用いて測定した結果を図4に示す。学習を繰り返すごとにモデルが改善され、結果的に切削抵抗が目標値である640Nに制御されている。各サイクルにおけるピッチ  $p$  の変化を表1に示す。

一定送り速度、一定ピッチの場合(加工法1)、各サイクル内の送り速度のみを初期モデルを用いて制御し切削抵抗一定化を図った場合(加工法2)、上記の通りピッチ及び送り速度両方を制御した場合(加工法3)について、加工時間を溝長さ1mm当たりについて比較したものを表2に示す。ただし、各サイクルにおける切削抵抗の最大値は3方法ともほぼ同じとして比較した。送り速度に加え、ピッチの制御も行うことにより、加工時間の最適化を図ることができた。

## 4. 結論

固定サイクルでは、加工パスは単純な形状の繰り返しで、かつパス設計の自由度が高いため、加工状態のモニタリング、工具パス及び加工条件の制御をシステムを実装することがより容易である。固定サイクルにより除去する形状を入力

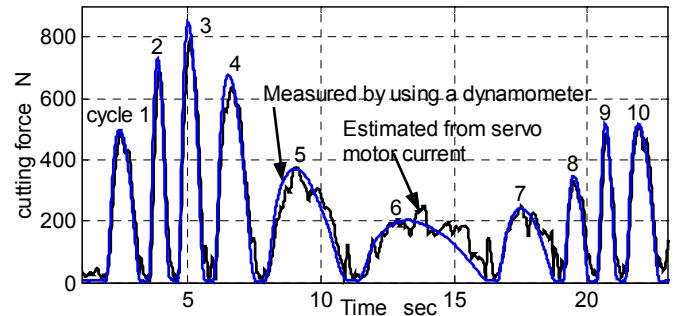


Fig. 3 Measured and estimated cutting forces in XY plane in 10 cycles of trochoidal grooving for model identification

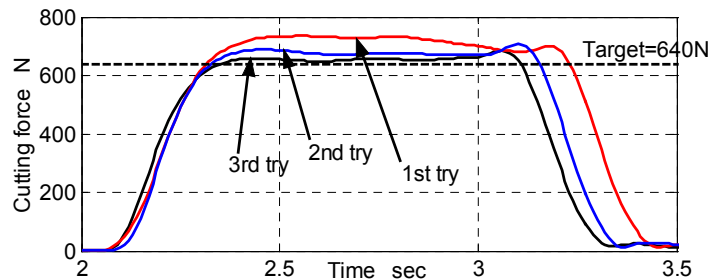


Fig. 4 Measured cutting forces in one cycle of trochoidal grooving as learning steps proceed.

Table 1 Pitch and the mean of measured cutting force within each learning step in trochoidal grooving

learning step	pitch mm	cutting force N
1st try	2.072	694.53
2nd try	1.829	659.26
3rd try	1.804	641.63

Table 2 Comparison of three tests in machining time to proceed 1 mm

	pitch, mm	feedrate mm/min	time to proceed 1 mm, sec
test 1 (constant feedrate, pitch)	1.0	1120	1.340
test 2 (optimized feedrate, constant pitch)	1.0	(varied)	1.075
test 3 (optimized feedrate and pitch)	1.804	(varied)	0.851

するだけで、内部のCLデータの入力が必要とせず、工具パス及び加工条件を学習的に最適化する手法を提案し、例としてトロコイド溝加工固定サイクルに適用しその効果を検証した。

## 参考文献

- [1] 新家 秀規：エンドミル加工の知能化に関する研究，京都大学博士論文，(2004)。
- [2] 松原 厚：機械加工におけるプロセス計測/制御技術の現状と動向，計測と制御，**41**, 11 (2002) 781。
- [3] 茨木，坂平，新家，松原，垣野：エンドミル加工における切削抵抗の推定法，精密工学会誌，**70**, 8 (2004), 1091。
- [4] 垣野，大塚，中川，佐々木：焼入れ鋼のエンドミル加工に関する研究(第1報)，精密工学会誌，**66**, 5 (2000), 730。
- [5] 安田，茨木，松原：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)，精密工学会秋季大会講演論文集，(2004), 277

