

生産リードタイムの短縮を目指した革新的自律型工作機械の研究

大阪大学・工・生産科学専攻 中本圭一、白瀬敬一
若松栄史、妻屋 彰、荒井栄司

1. はじめに

NC 工作機械が登場して約半世紀になる。現在では機械加工の多くが NC 工作機械により行われ、加工工程の自動化、加工部品の高精度化に寄与している。さらに NC 工作機械を運転するための NC プログラムも、CAM の進歩に伴い複雑な形状に対しても効率的に生成できるようになっている。

しかしながら、NC プログラムで指令する機械加工では、予め決定した切削条件を加工中に修正できないという本質的な問題がある。このため適切な切削条件を予め決定する必要があるが、現状の CAM で生成される NC プログラムでも、被削性や加工精度が考慮されているわけではなく、事前に試し削りを行い、さらに加工現場では作業者が切削条件を逐次修正して対処している。特に一品生産品である金型などに対しては、こうした作業に要する多大な時間と労力は無駄である。

このように非効率な試し削りを行わずに、作業者が加工状況を監視しなくても適切な切削条件で加工を継続して行うためには、工作機械に加工状況を自ら判断して切削条件を修正しながら機械加工を行うという自律的な機能が必要となる。またこの機能は、次世代の自律分散型生産システムにおいて、それを構成する工作機械に求められる機能でもある。

そこで本稿では、工作機械の自律化・知能化を目指す第一歩として本年度までに実現した、実時間で工具経路を生成する機能およびモニタリングされた情報を基に実時間で切削条件を修正する機能について報告する。

2. 実時間工具経路生成機能⁽¹⁾

2-1 本機能の目的

加工状況に応じてインプロセスで切削条件を修正するためには、実時間で工具経路を生成しながら加工を行う必要がある。現在の NC プログラムによる加工指令でも送り速度や主軸回転数であれば加工中に修正することはできるが、ピックフィードや切込みといった工具経路そのものを修正することは不可能であり、自律的に切削条件を修正する上では柔軟性が低い。これまでも実時間で工具経路を生成する手法は提案されているが⁽²⁾⁽³⁾、工具経路データ生成から機械加工までの総加工時間を短縮すること、大容量の NC プログラムを生成することなく高速・高精度な NC 加工を実現することに主眼が置かれており、NC 工作機械がインプロセスで切削条件を修正するような自律化・知能化には結びついていない。

2-2 実現手法

そこで本研究では、もともと NC プログラムを必要としない倣い加工に注目して、その倣い加工の原理を計算機内でシミュレートすることにより、実時間で工具経路を生成しながら NC 工作機械を制御できる仮想倣い加工システムを開発した。その実行画面の一例を図 1 に示す。

本システムでは計算機内にモデル化されたスタイラスとマスタモデルとの幾何学的な干渉量を検出し、スタイラスおよびそれに連動する工具の送り速度と送り方向を算出する。これを微小時間間隔（16msec）で繰り返して実時間で工具経路

を生成している。現在、ボールエンドミルとスクエアエンドミルの 2 種類の工具を対象としているが、その他の工具に拡張することは可能である。加工形状（計算機内のマスタモデル）は、汎用 CAD から直接 STL フォーマットで入力することができる。また、加工モードとしては、走査線加工モード（一方向倣い、往復倣い）と等高線加工モードが取り扱える。

走査線加工モードでは仮想スタイラスの中心軸と平行に、また等高線加工モードでは仮想スタイラスの中心軸と垂直に微小間隔の複数断面を用意し、それぞれの断面で 2 次的に干渉量を検出しその中で最大のものをこの仮想スタイラス位置における干渉量とすることで計算時間の短縮を図っている。

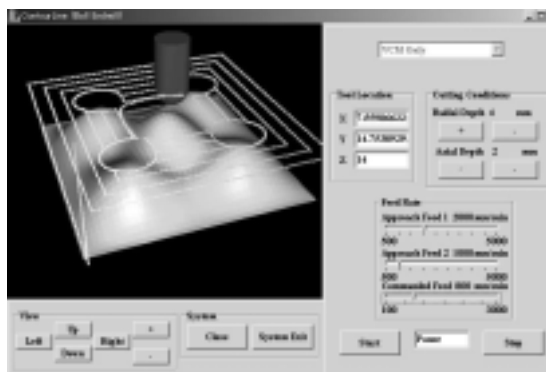
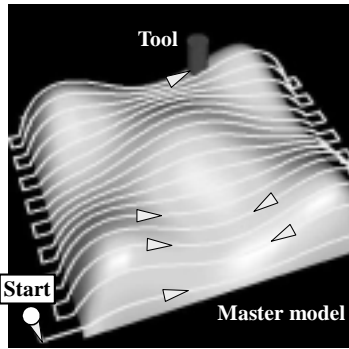


図 1 仮想倣い加工システムによる実時間工具経路生成例

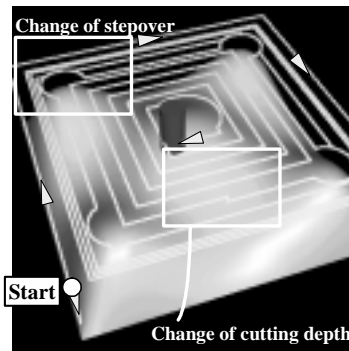
本システムによるシミュレーション結果として図 2 (a) に往復倣いの走査線加工モードを用いて生成した工具経路例を示す。この例では図中下方の加工開始点から、矢印で示すようにスタイラスがピックフィード毎に左右方向に往復移動することで工具経路を生成している。さらに等高線加工モードを用いた図 2 (b) では、加工開始点から被削材の中心に向かって時計回り方向にスタイラスが移動し、工具経路を生成している。

さらに図 2 (c)、(d) には等高線加工モードによる加工中に、本システムの実行画面 (GUI) を操作して切削条件を変更した例を示す。それぞれピックフィード、切込みを修正した部分の工具経路を示している。例えば図 2 (c) ではピックフィードが図中の A から B へ修正され減少していることが分かる。また図 2 (d) では工具経路の途中で即座に切込みが修正され C だけ減少していることが確認できる。加工中に切込みが変更されると加工面に段差が生じるが、本システムでは段差を取り除くための工具経路が新たに生成される。

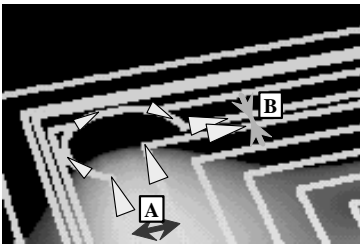
本システムでは、決して効率の良い工具経路を生成しているわけではない。しかしながら、実時間で工具経路を生成していることにより、現状の NC 加工では不可能な加工途中でのピックフィードおよび切込みの修正を可能としている。また、この機能を用いることで工作機械自らが加工状況をモニタリングし、それを工具経路や切削条件に反映するという工作機械の自律化が実現可能となる。



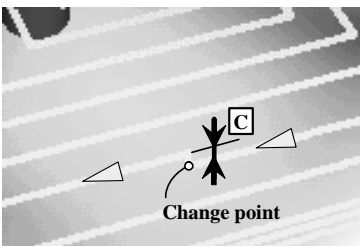
(a) 往復倅い走査線加工モード



(b) 等高線加工モード



(c) ピックフィードの修正



(d) 切込みの修正

図2 各加工モードによる工具経路例と切削条件の修正例

3. 自律的インプロセス切削条件修正戦略⁽⁴⁾

3-1 加工状況に応じた適応制御

フィードバック機構を中心とした適応制御は、これまでも研究されてきている。例えば、Altintasらはオープンアーキテクチャを有する工作機械で適応制御を実現している⁽⁵⁾。また光石らは、NCプログラムで運転中のNC旋盤へ開発した外部実時間コントローラから工具シフト量と送りオーバーライド値を指令して適応制御を実現している⁽⁶⁾。さらに、ドリル加工やタップ加工において内部センサを用いて加工状況を判断しながら適応制御を行う研究も行われている⁽⁷⁾、⁽⁸⁾。本研究でも加工状況に応じて切削条件を修正するが、前述した実時間工具経路生成によりNCプログラムを必要とせず、工具欠

損などで工具を交換しても工具に応じた工具経路を新たに生成しながら加工が継続できるという自律的な機能を実現できるという点が従来の研究と大きく異なる。

3-2 加工戦略

自律的な機械加工を実現するためには、検出される切削状況に適切に対処するためのアルゴリズムが不可欠である。このアルゴリズムには工具欠損時の代替工具の選択や切削条件の修正などが含まれるが、本報では切削負荷の大小に応じて切削条件を修正する自律的インプロセス切削条件修正アルゴリズムを考えた。図3に切削条件修正のフローチャート、図4に加工中のLaneとFaceの定義をそれぞれ示す。

Faceは軸方向切込みで加工するXY平面に平行な加工面で、1面ごとに加工が進行する。走査線加工モードでは、スタイラスがマスタモデルと接触する部分で図4(a)のFace i で示すようにマスタモデルに沿う曲面となる。Laneは半径方向切込み(ピックフィード)で加工する工具経路で、等高線加工モードでは、スタイラスがマスタモデルと接触する部分で

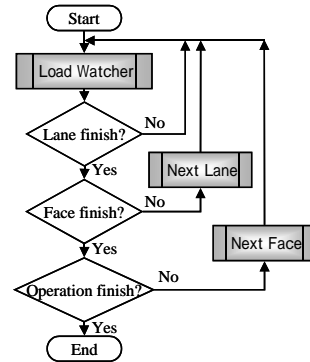
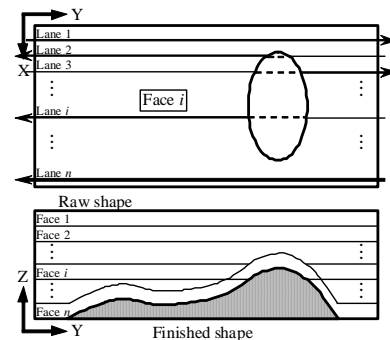
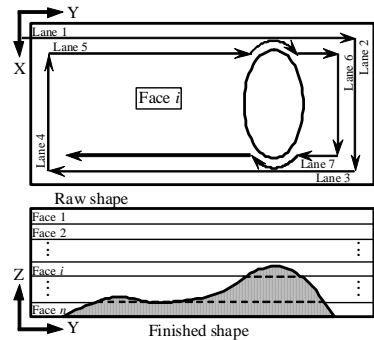


図3 提案する加工戦略のフローチャート



(a) 走査線加工モードにおけるLaneとFaceの定義



(b) 等高線加工モードにおけるLaneとFaceの定義

図4 加工戦略で利用されるLaneとFaceの定義

図 4(b) の Lane 5、7 で示すようにマスタモデルに沿う曲線となる。

提案する加工戦略では、まず被削材種、工具材質、工具径、製品に求められている精度などを考慮して、加工に適切な目標切削負荷（主軸ロード）Desired Load と、切削異常を回避するための危険切削負荷 Critical Load を決定する。これらの負荷は、予め切削シミュレータ⁽⁹⁾で推定しながら決定している。

Load が Critical Load を超えた場合

加工中の Load は主軸モータ電流から推定され、常に危険切削負荷 Critical Load と比較される。ここで Load が Critical Load を超えていた場合、瞬時に送り速度を減少させるか、切込みを半減させて切削異常を回避する。既に送り速度が十分に遅く下限値に満たない場合には切込みを半減させる。

Load が Desired Load より大きい場合

次に Load が Critical Load を超えないものの Desired Load より大きい場合には、送り速度を一定の割合で減少させる。ただし加工中の Load は大きく変動するので、検出された Load が連続して 10 回（約 160msec）にわたって Desired Load より大きい場合に、送り速度が修正される。

また、送り速度が下限値よりも小さい場合には、次の Lane 加工でピックフィードを減少させる。ピックフィードが下限値に達していた場合には、次の Face 加工で軸方向切込みを減少させる。

Load が Desired Load より小さい場合

Load が Desired Load よりも小さい場合には、送り速度を一定の割合で増加させる。この場合も検出される Load が連続して 10 回（約 160msec）にわたって Desired Load より小さい場合に送り速度が修正される。同様に、送り速度が上限値に達した場合には次の Lane 加工でピックフィードを増加させる。ピックフィードが上限値に達していた場合には、次の Face 加工で軸方向切込みを増加させる。

Load が Desired Load の範囲内である場合

Load が加工状況に対して適切とされる Desired Load の範囲内である場合には、切削条件の修正は行われない。しかし、次の Lane 加工におけるピックフィードを算出するために、Lane 加工中の最大切削負荷が maxLoad として記録されるとともに、平均切削負荷が avLoad として計算される。

4. 実験および検証

提案した「自律的な切削条件修正戦略」の有効性を検証するため、実際に NC 工作機械を制御して加工実験を行った。実験装置の概要を図 5 に示す。仮想加工システムを実行する計算機と NC 工作機械の制御装置とは HSSB と呼ばれる高速データバスで接続されている。

仮想加工システムでは工具微小移動量が NC 指令ブロックに変換され、NC 工作機械を DNC 運転するために出力される。実験に使用した計算機の場合、工具微小移動量の計算時間は平均で約 3msec であるが、計算時間の変動やデータ転送に要する時間を考慮して、工具位置情報を更新する制御時間間隔を 16msec として実験を行った。

また、加工中の切削負荷（切削トルク）は主軸電流から概

算した。主軸電流は NC 制御装置に準備されたソフトウェアライブラリを用いて簡単に検出することができ、特別なセンサは用いていない。

本研究で行った 2 種類のケーススタディにおける被削材種、予め設定した目標切削負荷、危険切削負荷および各切削条件（左より下限値、標準値、上限値の順）を表 1 にそれぞれまとめて示す。なお今回のケーススタディでは被削材形状、製品形状、工具は同じである。被削材形状は 60×60×20mm の直方体とし、製品形状は図 6 に示す自由曲面形状（60×60×15mm）工具は直径 10mm の 2 枚刃超硬ボールエンドミルである。図 7 に加工前と加工後の被削材形状の例を示す。

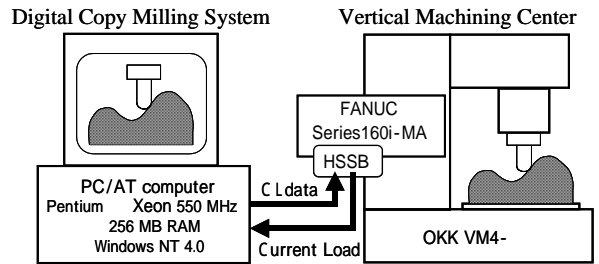


図 6 実験に用いられた計算機、制御装置およびマシニングセンタ

表 1 各ケーススタディでの切削条件

	Case study A	Case study B
Workpiece material	Cast iron (FC250)	Carbon steel (S45C)
Desired Load (Nmm)	800 ± 80	1200 ± 120
Critical Load (Nmm)	2000	4000
Feed (mm/min)	200, 400, 520	100, 200, 260
Radial depth (mm)	1.0, 2.0, 5.0	1.0, 1.0, 3.0
Axial depth (mm)	1.0, 2.0, 5.0	1.0, 1.0, 3.0

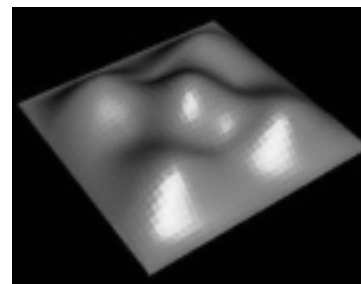


図 7 製品形状モデル

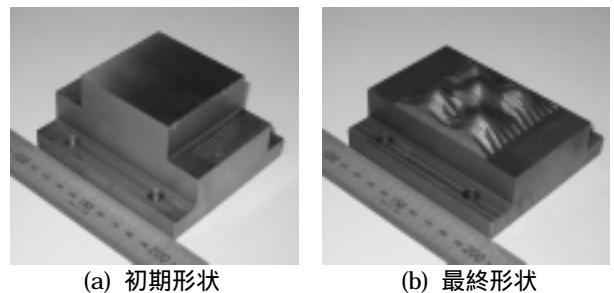


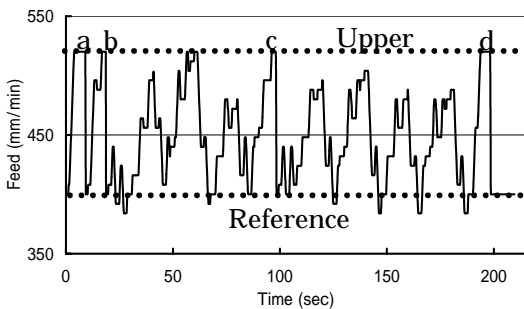
図 7 ケーススタディ結果（ケース A）

また、表 2 には実験中に修正された各切削条件の最小値、最大値および加工に要した時間をそれぞれ示す。また、ケーススタディ A における 1 段目の Face 加工中の送り速度、半径方向切込み（ピックフィード）切削負荷の履歴の例を図 8 にまとめて示す。

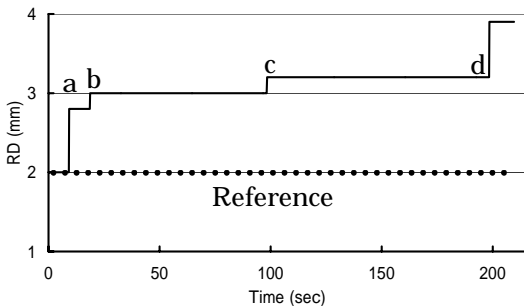
このケーススタディでは、目標切削負荷に比べて切削条件（標準値）が安全側に設定されていたため、まず送り速度を増加させる修正が行われている。そして、図中 a で示す時点で送り速度が上限値 520mm/min に達し、次に ピックフィード

表 2
各ケーススタディでの切削条件の修正範囲と切削時間

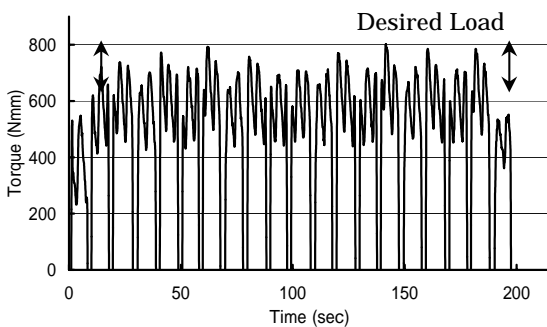
	Case study A	Case study B
Feed (mm/min)	168 ~ 520	68 ~ 260
Radial depth (mm)	2.0 ~ 5.0	1.0 ~ 3.0
Axial depth (mm)	2.0 ~ 2.1	1.0 ~ 1.7
Cutting time (min)	37	163



(a) 送り速度



(b) ピックフィード



(c) 切削トルク

図 8
ケース A における第 1 段 Face 加工中の送り速度、半径方向切込み（ピックフィード）、切削負荷の履歴

を 2.8mm に増加させる修正が行われている。さらに図中 b、c、d の時点でも修正が段階的に行われて、3.0、3.2、3.9mm に修正されている。この間、切削負荷は目標切削負荷の範囲で推移しており、切削条件が修正されて加工率が改善されることが分かる。

ここでは紙面の都合で一例しか示せないが、切削負荷を低減させるために、ピックフィードを減少させる修正も確認できた。軸方向切込みを増減させる修正も切削負荷の大小に応じて正しく行われ、工作機械自らが加工状況に応じて自律的に切削条件を修正することが可能であることを、切削実験で検証することができた。

5. 終わりに

「日本最後の聖域」とまで言われる金型業界は現在、中国やその他アジア諸国の安い人件費を背景とした生産力（モノ作り力）に脅かされ、未曾有の危機に瀕している。

本研究における最終目標は自律型（賢い）工作機械の開発であり、そのために提案する実時間工具経路生成手法と自律的インプロセス切削条件修正戦略である。これらが実現するならば、現在 CAM で生成されている NC プログラムが不要となることによる機械加工の柔軟性・即応性の向上ばかりか、工作機械自らが熟練技能者のように加工状況を判断しそれに合わせて切削条件を修正しながら加工を行うことが出来るようになる。また、このように賢い工作機械が協調し自律分散型の生産システムを構成するようになれば、更なる多品種少量生産・変種変量生産を効率良く行えるはずである。

「マザーマシン」のこのような革新的な変貌の波及効果は、その名の表す通り広く日本の総合的な製造力を再び向上させるものであると確信している。

6. 文献

- (1) 中本圭一 他；NC プログラムを必要としない機械加工のための仮想加工システムの開発（第 2 報），日本機械学会論文集(C)，67- 663，(2001)，3656-3661.
- (2) 鈴木 裕 他；金型実時間加工用数値制御システムの開発，精密工学会誌，53- 12，(1987)，1952-1958.
- (3) 入口健二 他；曲面細分割による工具経路生成方法，精密工学会誌，64- 11，(1998)，1618-1622.
- (4) 中本圭一 他；NC プログラムを必要としない機械加工のための仮想加工システムの開発（第 3 報），日本機械学会論文集(C)，69- 677，(2003)，270-277.
- (5) Y. Altintas., et al., : Open Architecture Modular Tool Kit for Motion and Machining Process Control, CIRP Annals, 47/1, (1998), 295-300.
- (6) M. Mitsuishi., et al., : A Practical Machining Condition Determination Strategy Using Multi-Axis Force Information, CIRP Annals, 45/1, (1996), 373-376.
- (7) 藤嶋 誠 他；知能化工作機械によるドリル加工に関する研究，精密工学会誌，66- 11，(2000)，1792-1796.
- (8) 山岡義典 他；タップ加工用知能化工作機械システムに関する研究，精密工学会誌，67- 8，(2001)，1338-1342.
- (9) 成田浩久 他；ヴァーチャルマシニングシミュレータを用いた NC プログラムの評価と修正，日本機械学会論文集(C)，66-648，(2000)，2871-2876.

