仮想加工制御の 自律型 NC 工作機械によるダイレクトマシニング*

白 瀬 敬 一^{*1}, 中 本 圭 一^{*2}

Direct Machining Operation Performed by Autonomous NC Machine Tool Controlled by Digital Copy Milling Concept

Keiichi SHIRASE^{*3} and Keiichi NAKAMOTO

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Kobe University,
1-1 Rokko-dai, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 657-8501 Japan

In order to shorten production lead-time, it is needed to eliminate time and efforts for process planning after product design. However, as far as a conventional NC machine tool is utilized, a reliable NC part program has to be prepared to achieve high cutting productivity and accuracy. It is a time consumed operation according to the fact that all cutting parameters are predetermined and coded as NC programs before the cutting operation to maintain the stable cutting operation and to avoid the cutting trouble for the whole cutting operation. The digital copy milling system which generates tool paths in real time has been developed to solve the problem mentioned above. In this study, a commercial process planning software is customized to integrate with the digital copy milling system for realizing an autonomous NC machine tool. The cutting operation performed by the digital copy milling system integrated with the commercial process planning software is compared to a conventional cutting operation performed by manual process planning using CAM software. The direct machining operation, which does not require any effort to prepare an NC part program, is performed successfully using a conventional NC machine tool associated with the digital copy milling system.

Key Words: Digital Copy Milling, Direct Machining, CAM, Process Planning, Machine Tool, Cutting

1. 結 言

NC 工作機械の普及によって機械加工の自動化、高精度化、高能率化が実現されてきた。さらに近年では、コンピュータの性能が飛躍的に向上して、NC プログラムの作成・検証を支援する CAM ソフトウェアの利便性が高まり、一部では加工手順や工具の選定の自動化が実現されている。しかしながら、CAM ソフトウェアには切削力や加工誤差、表面粗さ等を予測する機能が未だに備わっておらず、加工プロセスの良否を判断するには不十分である。このため、熟練作業者が経験や知識に基づいて工程設計や作業設計を行っており、NC プログラムを作成する負担は依然として重い。特に、金型に代表される一品生産品では、工程設計や作業設計を製品ごとに行う必要があり、これらに要する時間とコストが機械加工全体に要する時間とコストに占める割合は大きい。NC 工作機械が複合化・多軸化

によって高機能化していく中、加工の準備段階にあたる工程設計や作業設計はますます複雑となっており、高能率な機械加工を達成するためにはこれらの負担の軽減が必要不可欠である。

また、現状の NC 工作機械による機械加工は NC プログラムによる自動運転を前提としており、機械加工を始める前に工具経路や切削条件の全てが決定されて NC プログラムに記述されている。このために NC 工作機械の動作は固定され、加工中に加工トラブルが発生したとしてもこれを回避することができず、切削力等をモニタリングしたとしても加工状況に応じて切削条件を修正することができない。さらに、NC プログラムによる指令コードが NC 工作機械のハードウェアに依存しているため、複数の NC 工作機械で共用することができず、故障や特急仕事の投入に伴う生産スケジュールの変更に柔軟に対応することができないといった問題が存在している。

次世代の NC 工作機械には、作業者の助けを借りずに自発的に機械加工を行い、加工事例を経験しながら学習していく、自律知能的な機能の実現が求められる。

* 原稿受付 2007 年 11 月 16 日。

^{*1} 正員、神戸大学大学院工学研究科(☎ 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)。

^{*2} 正員、大阪大学大学院工学研究科(☎ 565-0871 吹田市山田丘 2-1)。

E-mail: shirase@mech.kobe-u.ac.jp

Fig. 1 Overview of realized "Direct machining"

そこで著者らは、現状の NC 工作機械の問題点を解決するために、NC プログラムを予め作成する必要のない加工の原理をデジタル化した、仮想加工と呼ぶ NC 加工システムを提案して、その有効性をこれまでに検証してきた^{(1)~(3)}。本研究では、まず金型加工用の工程設計支援ソフトウェアと上記の NC 加工システムを統合した自律型工作機械によるダイレクトマシニングの実現方法について述べる。そして、ダイレクトマシニングによる加工実験の結果を、作業者が工程設計を行い CAM ソフトウェアにより NC プログラムを作成する従来の NC 加工法と比較し、ダイレクトマシニングの有効性を示す。

2. ダイレクトマシニングの位置付け

NC 工作機械に適応制御機能を付加し、自律化・知能化を指向した研究は既に行われている^{(4)~(8)}。Altintas⁽⁴⁾や Mori⁽⁵⁾はそれぞれオープン CNC を開発し、検出される切削力や予測される金属除去率を基に、適応制御機能を実現している。また、Kakino⁽⁶⁾らは工具の動作が比較的単純なドリル加工やタップ加工を対象にして、データベースと適応制御機能、学習機構により良好な送り速度を決定し、検出した切削トルクから工具摩耗と切り屑つまりの認識、工具寿命の監視、自動ペッキングを実現している^{(6)~(7)}。さらに Mitsuishi⁽⁸⁾らは、実時間で加工状況を判定しながら安定限界線図を自動的に求め、加工中に変更が容易な切削条件である主軸回転数や送り速度だけでなく切込みも適応制御の対象とすることを提案している⁽⁸⁾。しかしながら、従来の研究では NC 工作機械が NC プログラムで運転されるという前提はそのままで、加工中のトラブルが発生しない NC プログラムを予め作成するとともに、適応制御機能（送り速度の増減）により加工状況を改善することが意図されている。

一方、著者らは NC プログラムを予め作成することなく、加工状況に応じて工作機械の動作（工具経路）を動的に柔軟に変更できる仮想加工システムを提案し、工作機械の自律化・知能化を実現してきた^{(1)~(3)}。さらに、開発した工程設計・作業設計システムと統合

Fig. 2 Commercial process planning software "Mill-Plan"

することで、素材と製品形状の 3 次元 CAD データに基づいて加工手順、使用工具、切削条件を自動決定して即座に加工を開始するダイレクトマシニングを提案した⁽⁹⁾。これらの技術を基盤とし、本研究ではさらに実用的な市販の工程設計支援ソフトウェアと仮想加工システムを統合して、ダイレクトマシニングを実現した。そして、作業者が CAM ソフトウェアを利用して予め NC プログラムを作成する従来の NC 加工と比較することで、仮想加工を用いた自律知能型工作機械によるダイレクトマシニングの有効性を検証した。なお、NC プログラムを予め作成しないという観点から、Narita⁽¹⁰⁾らも簡便な工具経路生成手法と実時間での切削シミュレーションを組合せて、自律加工の実現を試みている⁽¹⁰⁾。

3. ダイレクトマシニングの実現

3・1 ダイレクトマシニングの概要 仮想加工システムを利用すると、製品形状と素材形状を用意すれば、NC プログラムを CAM ソフトウェアで作成することなく即座に加工が開始できる（これをダイレクトマシニングと呼ぶ）が、そのためには予め加工手順、使用工具、切削条件を決定する工程設計・作業設計が必要となる。そこで本研究では、(株)豊田中央研究所で開発された Mill-Plan と呼ばれる工程設計支援ソフトウェアと統合し、実用的なダイレクトマシニングを実現して、その有効性を検証した。実現したダイレクトマシニングにおける情報の流れを図 1 に示す。CAD ソフトウェアで設計した製品形状と素材形状を Mill-Plan に入力すれば、工程設計機能で自動的に工程情報（加工手順、各工程での加工領域、ツーリング、切削条件等）が作成され、仮想加工システムへと入力される。仮想加工システムでは、工程情報を基に実時間で工具経路を生成しながら、その NC コードを工作機械に送信することで、直ちに加工を開始することができる。すなわちダイレクトマシニングでは、作業者が行っていた工程設計、CAM ソフトウェアを利用した

Table 1 Process planning parameters

Item	Example
Process No.	1, 2, ...
Tool path pattern	Scanning X, Contour Out to In, ...
Tooling No.	1, 2, ...
Tool type	Ball end mill, Square end mill
Tool diameter	8 (mm)
Workpiece type	Rectangular solid, Cylinder
Workpiece dimension	-X 40 (mm), +X 40, ...
Spindle speed	6000 (min^{-1})
Feed	2000 ($\text{mm}/\text{min}^{-1}$)
Radial depth of cut	2.5 (mm)
Axial depth of cut	1.0 (mm)
Tool length compensation	148.972 (mm)

Fig. 3 Digital copy milling system

NC プログラムの作成が必要なくなり、加工準備段階で費やされる時間と労力が大幅に軽減される。

3・2 工程設計支援ソフトウェアとの統合 仮想加工システムと統合した Mill-Plan は、金型を対象とした製品形状と素材形状から各ツーリングでの加工体積あるいは加工面積を算出し、最も効率的な荒加工、仕上げ加工などの加工手順と各工程のツーリングや切削条件を決定することができる。図 2 に Mill-Plan のシステム構成を示すように、工具・ホルダの情報を予めデータベースに登録し、工具毎に切削条件を設定しておく必要はあるが、自動で様々なツーリングのモデルを生成して切削シミュレーションを行い、ツーリングの剛性評価、突き出し長さによる切削条件の修正なども行える数少ない市販の工程設計支援ソフトウェアである。また、カスタマイズが比較的容易であり、仮想加工システムと同様に製品形状の表現に STL 形式の CAD データを採用しているという特徴がある。

上述したように、Mill-Plan は工程設計支援ソフトウェアとしての機能を十分に有しているが、本研究で仮想加工システムと統合するために以下の機能を追加した。

- (1) Mill-Plan が有するツーリングについて、T 番号 (NC 工作機械での工具交換制御に用いられるツーリング番号) および工具長補正量が設定できるようにした。これにより、NC 装置で管理するツーリング情報を Mill-Plan と共有することが可能となった。
- (2) 工程情報の受渡しのために Mill-Plan が作成する工程情報をテキスト形式のファイルで出力するよう

Table 2 Equipments and workpiece in experiments

	Machine tool	CNC	Connection	Workpiece
A	FANUC ROBODRILL $\alpha 14$ -B	FANUC 16i-MB	RS-232C	SKD11 ($\phi 89 \times 37$ mm)
B	OKK VM4-III	FANUC 180i-MB	High Speed Serial Bus	SKD11 ($60 \times 60 \times 25$ mm)
C	Mitsubishi Heavy Industries DCV50	FANUC 18i-MB	High Speed Serial Bus	A5052 ($150 \times 150 \times 100$ mm)

Table 3 Detailed cutting conditions of each experiment

	No.	Procedure	Pattern	Tool type	S	Feed	RD	AD
A	1	Rough	Contour	Square $\phi 20$	800	140	2.0	5.5
	2	Semi-F	Scanning	Ball R3	8000	1000	0.4	—
	3	Finish	Scanning	Ball R1.5	14000	1600	0.1	—
	4	Finish	Contour	Square $\phi 12$	2300	828	0.1	—
B	1	Rough	Contour	Square $\phi 10$	5000	2000	5.0	1.0
	2	Rough	Contour	Ball R4	6000	2500	5.0	0.5
	3	Semi-F	Scanning	Ball R4	6000	2000	2.0	—
	4	Finish	Scanning	Ball R3	10000	2000	0.1	—
C	1	Rough	Contour	Ball R6	14000	1200	4.0	3.0
	2	Rough	Contour	Ball R6	16000	1200	4.0	1.0
	3	Finish	Contour	Ball R3	16000	800	0.15	1.0
	4	Finish	Contour	Ball R3	16000	800	0.15	0.15
	5	Finish	Contour	Ball R3	16000	800	0.15	—

S : Spindle speed, RD : Radial depth of cut, AD : Axial depth of cut

(a) Test cut A

 (b) Test cut B (c) Test cut C
Fig. 4 Finished shapes by digital copy milling system

にした。また工程情報として、加工領域、工具経路パターン、使用ツーリング情報 (T 番号、工具長補正量、工具径補正量)、切削条件の情報を追加した。表 1 には出力される工程情報のデータ項目を示す。

- (3) ツーリング情報は、Mill-Plan の操作画面でデータ入力を行う必要があるが、将来的には NC 装置が管理する工具情報から自動的に生成されるべきである。このため、工具データおよびホルダデータに管理番号を付加して、それを可能にした。

3・3 仮想加工システムの評価 仮想加工システムの実行画面を図 3 に示すが、仮想加工システムでは製品形状の 3 次元 CAD データ (STL 形式) と Mill-Plan で生成された加工領域、ツーリング、

Fig. 5 Verification of cutting accuracy depending on feed speed

切削条件等の工程情報から工具経路を生成して NC 工作機械を制御する。工具経路は、直方体あるいは円筒で指定された加工領域を走査線あるいは等高線の工具経路パターンで加工するように生成される。そこでまず、様々な工作機械を用いて、金型のキャビティやコアを想定した種々の製品形状を対象にし、生成される工具経路の良否を検証した。

なお本研究では、実用性を高めるために前報^{(1)~(3)}までに開発してきた仮想加工システムに以下に示す修正を加え、より効率的な機械加工が実現できるようにした。

- (1) 等高線加工の仕上げ工程において、製品形状の水平断面を予め抽出することで、荒加工済み箇所の工具経路生成を省略してエアークットを少なくし、製品形状の輪郭部だけを加工できるようにした。
- (2) (1)で追加した等高線輪郭加工では、製品形状が緩やかな傾斜面を持つ場合に半径方向の切込み（ピックフィード）が大きくなり加工面が悪化する。これを解決するために等高線輪郭加工で生成された工具経路に対して一定のピックフィードで工具経路を追加する等高線オフセット加工を追加した。
- (3) 等高線加工において外側から内側へ向けた工具経路パターンの他に、内側から外側へ向けた工具経路パターンを追加した。
- (4) 走査線および等高線で生成する工具経路に、円弧経路で進入し、同様に円弧経路で退出する機能を追加した。
- (5) 加工済みの加工面を再び加工していることが検出された場合には、工具を加工面から離して工具摩耗を抑制するようにした。

検証実験の内容を表 2 および表 3 にまとめて示す。また加工結果を図 4 に示すが、ここで行った 3 種類の検証実験全てにおいて、特に問題なく加工を終了することができた。加工結果の外観には、曲面部に三角パッチの形状が確認できたが、これは仮想加工システムにおいて仮想マスタモデルを STL 形式の CAD デ

Table 4 Equipments for practical cutting experiment

Machine tool	OKK VM4-III (FANUC 180s-MB)
Computer	Dell Precision 370 (CPU: Pentium 4 3.0 GHz, RAM: 1GB)
Connection	High Speed Serial Bus
Cutting tool	R4 Ball end mill (Overhang: 40 mm) R3 Ball end mill (Overhang: 35 mm)
Workpiece	NAK80 (60×60×25 mm)
CAM software	hyperMILL (OPEN MIND Technologies)

Fig. 6 Targeted product shape

ータで定義しているためであり、この結果から仮想マスタモデルの形状どおり加工が行われていることが分かる。これに対し、CAD ソフトウェアで作成される曲面形状により近い形状を加工しようとした場合には、さらにトレランスを小さくし、微小な三角パッチで曲面を近似する必要がある。しかしながら、現状の仮想加工システムでは、計算時間の増加のために、実時間で工具経路を生成することが困難となり、NC 工作機械への指令が途切れ、工具送りの揺動を引き起こすこととなる。

また、加工精度を評価するために検証実験 A により得られた製品形状を Carl Zeiss 社製 CNC 三次元座標測定機 PRISMO VAST により測定して仮想マスタモデルの形状と比較した。図 4(a)内に示した斜面 a、水平面 b、垂直面 c において加工精度は ± 0.0125 mm 以内と良好な結果が得られた。球面部 c、円筒部 d では ± 0.025 mm と悪化した。これは STL 形式に変換した際のトレランスが加工精度に反映されたためと考えられる。

さらに、送り速度を変化させた場合の加工精度への影響を検証するために、図 5 に示した高さ約 50 mm の八角錐形状を、仕上げ代を 0.1 mm 残して荒加工した後、500 ~ 6000 mm/min⁻¹ までの様々な送り速度で等高線加工を行った。使用した実験設備は表 2 内の検証実験 C と同様であり、工具に半径 1 mm のボールエンドミルを用い、切削条件は主軸回転数 14000 min⁻¹、半径方向切込み 0.1 mm とした。この結果、送り速度が 3000 mm/min⁻¹ を超えると図 5 左上に示すような稜線のオーバーカットが顕著に現れることが分かった。仮想加工システムでは、NC 工作機械の制御装置の制御周期と同期するように微小な工具経路を生成しているが、送り速度が大きくなると生成される工具経路が長くなってトレランスが悪化し、その間にコーナー部を通過するとオーバーカットやアンダーカットを引き起こす。今回の検証実験では、工具経路を 16 msec ごとに生成

Table 5 Process planning parameters and finished shapes in direct machining operation

Process No.	1	2	3
Procedure	Rough	Semi-Finish	Finish
Tool path pattern	Contour Out to In	Scanning	Scanning
Tooling No.	302	302	301
Tool type	Ball end mill	Ball end mill	Ball end mill
Tool diameter (mm)	8 (R4)	8 (R4)	6 (R3)
Workpiece type	Rectangular solid	Rectangular solid	Rectangular solid
Workpiece dimension			
-X (mm) ~ +X (mm)	-31.0 ~ 30.0	-31.0 ~ 30.0	-31.0 ~ 30.0
-Y (mm) ~ +Y (mm)	-31.0 ~ 30.0	-31.0 ~ 30.0	-31.0 ~ 30.0
-Z (mm) ~ +Z (mm)	-2.458 ~ 15.0	-2.458 ~ 15.0	-2.958 ~ 9.391
Spindle speed (min^{-1})	6000	6000	10000
Feed ($\text{mm}/\text{min}^{-1}$)	1500	1500	1412
Radial depth of cut (mm)	1.8	1.8	0.1
Axial depth of cut (mm)	1.007	0.5	0.1
Tool length compensation (mm)	140.247	140.247	149.375
Tool radius compensation (mm)	8	8	6
Cutting time (Total : 113 min 25 sec)	46 min 16 sec	4 min 2 sec	63 min 7 sec
Machined result

Table 6 Process planning parameters and cutting time in conventional machining operation

Process No.	1	2	3	4	5	6	7
Procedure	Rough	Rough	Rough	Semi-Finish	Finish	Finish	Finish
Tool path pattern	Contour	Pocket	Pocket	Contour	Pocket	Pocket	Contour
Spindle speed (min^{-1})	10000	10000	10000	10000	10000	10000	12000
Feed ($\text{mm}/\text{min}^{-1}$)	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Radial depth of cut (mm)	3.0	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	In cusp
Axial depth of cut (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	-
Cutting time (Total : 98 min 12 sec)	43 min 4 sec	1 min 13 sec	6 min 35 sec	4 min 36 sec	3 min 5 sec	18 min 52 sec	20 min 47 sec

Fig. 7 Finished shapes in comparison cutting experiment

しているが、新しい制御装置 (FANUC 30i) を用いれば工具経路の生成周期を 8 msec 以下にすることが可能であり、この問題を大幅に改善することができる。

以上の検証実験から、開発した仮想加工システムでは仮想マスタモデルを STL 形式の CAD データで定義していることに起因する加工精度の低下と、NC 制御装置の制御周期に起因する工具経路のトレランスの悪化が認められたが、これらは仮想加工システムの本質的な問題ではなく、計算機の処理能力が改善されれば解消される問題である。これらに対して、現

状においても荒加工から中仕上げ工程の要求精度であれば一般的な金型のキャビティやコア形状の加工において、NC プログラムを作成することなく実現できる点で仮想加工システムの効果を実証することができた。

4. ダイレクトマシニングの検証

工程設計支援ソフトウェアと統合した仮想加工システムを用いて実現した自律型 NC 工作機械によるダイレクトマシニングと、作業者が工程設計を行い

CAM ソフトウェアにより NC プログラムを作成する従来の NC 加工とを比較する加工実験を行った。実験に用いた設備を表 4 に、対象とした製品形状を図 6 に示す。なお、STL 形式の CAD データの容量は 875 KB であった。

工程設計支援ソフトウェアで作成された工程情報と、仮想加工システムによる加工結果を表 5 にまとめて示す。本実験から製品形状と素材形状の CAD データから各工程情報が作成され、即座に NC 工作機械による加工が行えることが確認できた。また、総加工時間は 113 分 25 秒であったが、加工中に特に問題は発生しなかった。次にダイレクトマシニングと比較するために、NC プログラムを作成する従来の NC 加工を行った。全く同一の製品形状と加工設備に対して、工作機械メーカーの作業者が作成した工程情報と加工時間を表 6 に示す。使用した CAM ソフトウェアは hyper MILL であり、総加工時間は 98 分 12 秒であった。加工時間は選定する切削条件、特に送り速度や切込みにより左右されるが、概ね同様の切削条件が選定されている。

図 7 に両者で得られた加工結果を示すが、特に違いは見受けられず、仮想加工システムにより加工した製品形状の曲面部に僅かながら三角パッチが確認できただけであった。また、総加工時間は従来の NC 加工に対してダイレクトマシニングの方が時間を要したが、従来の NC 加工では作業者が工程設計を行い、CAM ソフトウェアを操作して NC プログラムを作成する時間が別途必要となる。この製品形状の場合では、熟練者であっても 1 時間弱の作業時間を要し、加工準備時間を含めた総合的なリードタイムはダイレクトマシニングの方が短縮することができる。

したがって本実験により、素材と製品形状の CAD データに基づいて加工手順、使用工具、切削条件を自動決定して即座に加工を開始するダイレクトマシニングの有効性を検証することができた。

5. 結 言

機械加工の準備段階にあたる工程設計や作業設計に要する時間とコストを削減し、高能率な機械加工を達成すること、および加工前に予め工具経路や切削条件を決定して工作機械の動作を固定してしまう NC プログラムによる従来の加工方法の問題点を解決することを目指し、NC プログラムを予め作成する必要のない仮想加工システムを用いた自律型 NC 工作機械によるダイレクトマシニングの研究に取り組み、以下の結果を得た。

- (1) 工程設計支援ソフトウェアと実時間で工具経路を生成できる仮想加工システムを統合することで、製品と素材形状の CAD データさえあれば、製品設計終了後、即座に加工を開始することができる実用的なダイレクトマシニングを実現した。
- (2) ダイレクトマシニングに用いられる仮想加工システムで荒加工から中仕上げ工程の要求精度であれば一般的な金型のキャビティやコア形状の加工が可能であることを確認した。
- (3) 作業者が工程設計を行い、CAM ソフトウェアを利用して NC プログラムを生成する従来の NC 加工と比較し、加工準備時間を含めた総合的なリードタイムはダイレクトマシニングの方が短縮できることを示し、ダイレクトマシニングの有効性を確認した。

謝 辞

本研究は平成 16、17 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業として実施されました。本研究開発事業の助成をしていただいた経済産業省および経済産業省近畿経済産業局に謝意を表するとともに、2 年間の研究開発事業にご尽力いただいた関係各位に感謝いたします。

文 献

- (1) Shirase, K., Kondo, T., Okamoto, M., Wakamatsu, H. and Arai, E., Development of Virtual Copy Milling System to Realize NC Programless Machining (1st Report), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 66, No.644 (2000), pp. 1368-1373.
- (2) Nakamoto, K., Shirase, K., Wakamatsu, H. Tsumaya, A. and Arai, E., Development of Virtual Copy Milling System to Realize NC Programless Machining (2nd Report), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 67, No.663 (2001), pp. 3656-3661.
- (3) Nakamoto, K., Shirase, K., Wakamatsu, H. Tsumaya, A. and Arai, E., Development of Digital Copy Milling System to Realize NC Programless Machining (3rd Report), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 69, No.677 (2003), pp. 270-277.
- (4) Altintas, Y. and Erol, N.A., Open Architecture Modular Tool Kit for Motion and Machining Process Control, *Annals of the CIRP*, Vol. 47, No. 1 (1998), pp. 295-300.
- (5) Mori, M., Yamazaki, K., Fujishima, M., Liu, J. and Furukawa, N., A Study on Development of an Open Servo System for Intelligent Control of a CNC Machine Tool, *Annals of the CIRP*, Vol. 50, No. 1 (2001), pp. 247-250.
- (6) Fujishima, M., Kakino, Y., Matsubara, A., Sato, T. and Nishiura, I., Study on Advanced Drilling by Intelligent Machine Tools (1st Report), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 66, No. 11 (2000), pp. 1792-1796.
- (7) Yamaoka, Y., Kakino, Y., Sato, T. and Suzuki, Y., High Speed, High Productive Tapping by Intelligent Machine Tools (2nd Report), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 67, No. 8 (2001), pp. 1338-1342.
- (8) Mitsuishi, M., Nagao, T., Ohata, T. and Okabe, H., A Practical Machining Condition Determination Strategy Using Multi-Axis Force Information, *Annals of the CIRP*, Vol. 45, No. 1 (1996), pp. 373-376.
- (9) Shirase, K., Nakamoto, K., Arai, E. and Moriwaki, T., Autonomous Machine Tool to Realize Flexible Machining Operation Unconstrained by NC program, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 70, No. 11 (2004), pp. 1449-1454.
- (10) Narita, H., Shirase, K., Wakamatsu, H. Tsumaya, A. and Arai, E., Autonomous Milling Operation Based on Real Time Cutting Process Simulation, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 69, No. 2 (2003), pp. 227-231.