

仮想倣い加工システムによるダイレクト金型加工

神戸大学工学部機械工学科
教授 白瀬 敬一
(平成 16 年度研究開発助成 AF-2004012)

キーワード：仮想倣い加工，ダイレクト金型加工，自律型工作機械

1. はじめに

NC 工作機械は加工の自動化，高能率化，高精度化に貢献している．しかし登場して半世紀が過ぎ，機械本体や NC 制御装置が進歩したにもかかわらず，予め作成した NC プログラムで指令するという点では変化がない．このため，加工中に切削条件や工具経路を変更することができず，加工プロセスに応じた適応制御などの智能化・自律化が遅れている．また，金型加工は典型的な一品生産であるが，加工するためには予め NC プログラムを作成しなければならない．この NC プログラムを作成するために，多大な時間と労力が必要となっている．

一方，著者らは NC プログラムを予め作成することなく，加工中に実時間で工具経路を生成することのできる仮想倣い加工システム^{1) 2)}を開発し，インプロセス切削条件修正戦略³⁾を提案して，自律的な機械加工が実現できることを検証してきた．

そこで本研究では，加工順序或使用工具，切削条件を自動的に決定することのできる工程設計／作業設計システムを開発して，NC プログラムを予め作成する必要がなく，製品形状および素材形状の CAD データから，そのまま金型加工を始めること（題目のダイレクト金型加工）が可能な知能型・自律型の NC 工作機械を実現した．

さらに複雑な金型形状の加工や高品位の金型加工に有利だとして注目されている5軸加工に対して，工具・被削材の干渉を簡便にチェックするアルゴリズムを考案して，仮想倣い加工システムによる5軸加工を実現した．

2. 工程設計・作業設計システム

開発した工程設計・作業設計システムのフローチャートを図1に示す．システムは前半の工程設計と後半の作業設計の部分で構成されている．熟練作業者は使用する工作機械や工具を念頭において，望ましい加工工程を作成するが，計算機でこれを実現することは難しい．そこで，加工領域を3種類の分割方法で分割し，それぞれの分割案に対して工程設計および作業設計を行い，加工時間が最短となる加工工程案を選択して1つの加工工程を決定することにした．

2・1 加工除去領域の抽出

工程設計を自動化する目的で，加工フィーチャの概念を利用した研究が幅広く行われており，これらの研究は Shah⁴⁾や Vandenbrande⁵⁾によって詳細にまとめられている．しかし，加工フィーチャや製品形状に対する制約が多い．また，多くの研究では製品形状から加工フィーチャが認識されているが，これでは素材形状によって変化する加工除去領域が把握できず，満足な工程設計を行うことはできない．

そこで本研究では，素材形状と最終加工形状の3次元 CAD モデルから加工除去領域 (TRV : Total Removal Volume) を抽出して工程設計に利用している．図2に素材形状と製品形状から抽出された TRV の例を示す．この場合，加工途中の形状を素材形状と見なすことで，加工トラブルなどの加工途中で再び工程設計を行うことが可能になる．なお，本研究では簡単のために，TRV は直方体と円柱で構成されるものと仮定した．

2・2 加工プリミティブの生成

加工プリミティブは機械加工の最小単位で，抽出された TRV を分割して生成する．本研究で扱う加工プリミティブは，直方体と円柱と仮定しており，TRV を以下に示す2つの単純なルールで分割して加工プリミティブを生成している．

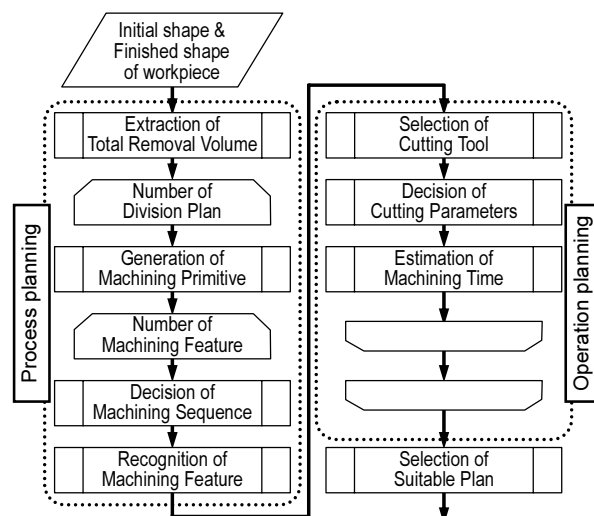


Fig.1 Flowchart of flexible process and operation planning system proposed

1. xy , yz , zx 平面に平行な平面で分割する.
2. TRV が有する面を含む平面で分割する.

ここでは, z 軸方向の加工高さを重視して初めに xy 平面に平行な平面で分割した後に, xy 平面に垂直な平面で分割を行う. その際に,

- (a) yz 平面に平行な平面で分割する (分割案1)
- (b) zx 平面に平行な平面で分割する (分割案2)
- (c) 加工プリミティブができるだけ大きくなるように, yz , zx 平面に平行な平面で分割する (分割案3)

の3種類の分割案で加工プリミティブを生成する. 生成される加工プリミティブの例を図3に示す.

2・3 加工順序の決定

加工順序は加工プリミティブの空間関係に基づいて, 以下のルールに従って決定する. ルール中のオープンフェースは, 加工プリミティブを構成する面で大気と接する面を指し, 加工が進むと新たに現れるオープンフェースも考慮しなければならない.

1. 加工プリミティブ最上面の z 座標値が大きい順 (上にある加工プリミティブから順) に加工する.
2. 最上面の z 座標値が同じ場合には, 体積の大きい

加工プリミティブから加工する.

3. 体積も同じ場合は, オープンフェースの多い加工プリミティブから加工する.
4. 1,2,3のルールで加工順序が決定できない場合には, TRV の中央に近い加工プリミティブから加工する.
5. 穴 (円柱の加工プリミティブ) は最後に加工する.

図3に示した加工プリミティブから決定される加工順序を, 図中の番号で示す.

2・4 加工フィーチャの認識

加工プリミティブの加工順序が決まると, オープンフェースの数と稜線の関係から, 加工フィーチャを認識する. 本研究で扱う加工フィーチャは図4に示した9種類で, 図5に示したフローチャートに従って認識される. 加工が進むと新たに現れるオープンフェースも考慮しながら9種類の加工フィーチャが認識される. なお, 9番目の Free Form (自由曲面) は, 加工プリミティブを構成する面が自由曲面となっており, オープンフェースの数とは無関係に認識される.

2・5 使用工具の選択と工具径の決定

認識された加工フィーチャに応じて使用工具が選択される. 本研究では9種類の加工フィーチャごとに使用工具の種類が予め決めている. さらに, 使用工具

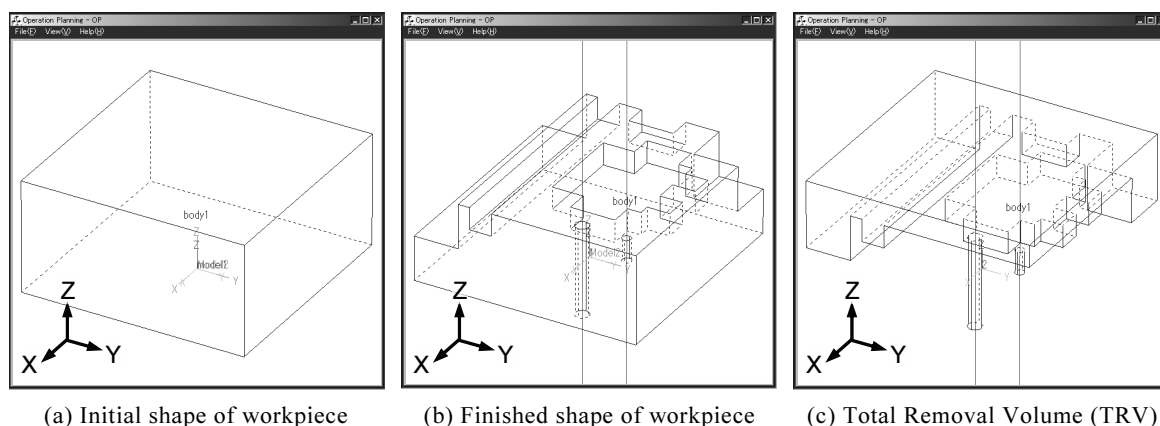


Fig.2 Initial and finished shapes of workpiece and Total Removal Volume (TRV) to be machined

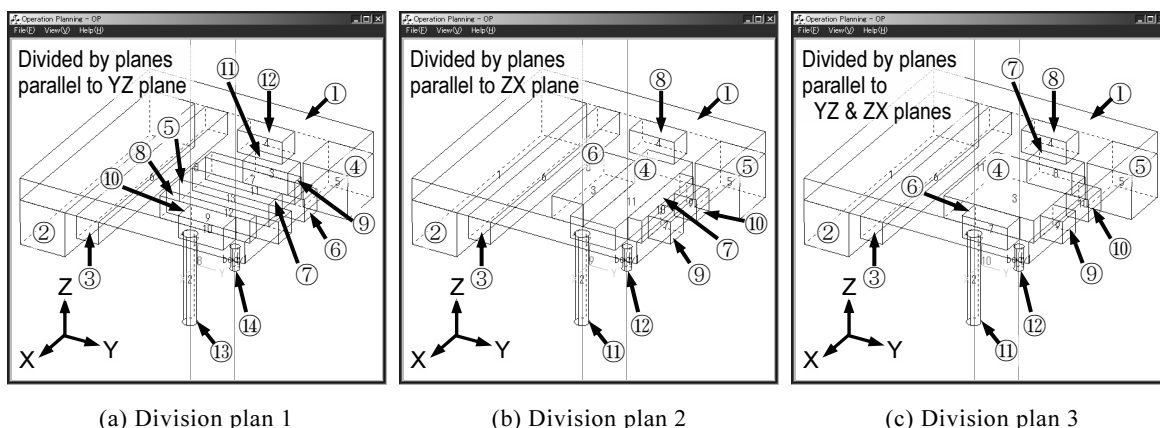


Fig.3 Machining primitives generated from TRV and machining sequence determined from geometric relation among machining primitives

の種類が決定されると、加工フィーチャの寸法と工作機械が保持する工具の関係から、その加工フィーチャの加工にふさわしい工具径が決定される。ここでは、工作機械が自律的に使用工具を選択し、工具径を決定するという観点から、保持している工具情報が予め用意されているものと仮定している。各加工フィーチャに対する工具径の決定方法を図6にまとめて示す。

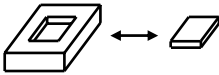
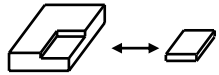
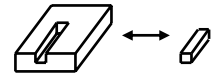
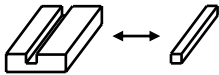
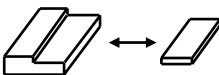
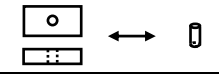
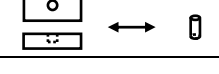
Machining feature		Number of open face
Closed Pocket		1 face
Open Pocket		3 faces
Closed Slot		2 faces
Open Slot		3 faces
Face		5 faces
Step		4 faces
Thorough Hole		2 faces
Blind Hole		1 face
Free Form		----

Fig.4 Machining features considered in this study

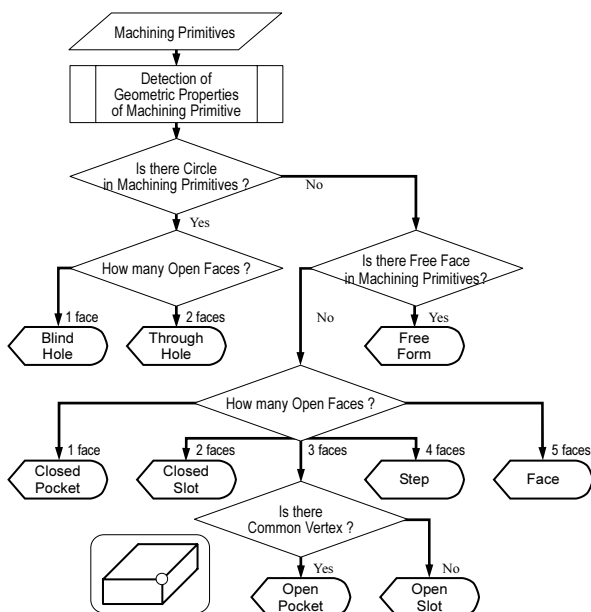


Fig.5 Flowchart of machining feature recognition

2・6 切削条件の決定⁶⁾

本研究では、作業者が過去の経験を参照して切削条件を決定するように、過去に行った加工事例をデータベースに蓄えておき、それを参照しながら切削条件を推論する事例ベース推論 (Case Based Reasoning: CBR) を用いて切削条件を決定している。切削条件推論システムでは、加工事例データベースから加工内容 (被削材や工具など) に類似した事例が抽出される。抽出された加工事例に含まれる切削条件は、加工内容の違いを考慮して修正され、それらの平均値を解として切削条件が決定される。

2・7 加工能率の評価

工程設計および作業設計は3種類の加工領域分割案に対してそれぞれ行われるが、それぞれの加工工程案について総加工時間を予測して加工能率の点で最善となる加工工程案が選択される。総加工時間 T は次式で評価している。

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + \cdots + t_{n-1} + t_n + t_c \times m \quad (3)$$

ここで、 t_i は加工プリミティブ i の加工に要する時間、 t_c は工具交換時間、 m は工具交換回数である。また、時間 t_i は次式で評価している。

$$t_i = V_i / Q_i \quad (4)$$

$$Q_i = A d_i \times R d_i \times F_i / 60 \quad (5)$$

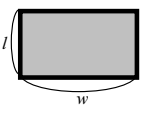
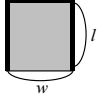
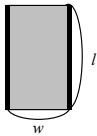
Machining feature	Selection of cutting tool
Closed Pocket	 x : Tool diameter, $l < w$. End mill which satisfies $5x \leq l$
Open Pocket	Flat end mill which has maximum diameter
Closed Slot	 w : Width of slot. End mill which satisfies $3x \leq w$
Open Slot	 w : Width of slot. End mill which satisfies $3x \leq w$
Face	Face mill which has maximum diameter
Step	Face mill which has maximum diameter
Thorough Hole	Drill which fit to hole
Blind Hole	Drill which fit to hole
Free Form	Ball end mill which has maximum diameter

Fig.6 Selection of cutting tool and its diameter for each machining feature

ここで、 V_i は加工プリミティブ i の体積、 Q_i は加工プリミティブ i を加工する際の金属除去量である。 Ad_i 、 Rd_i 、 F_i は加工プリミティブ i を加工する際の軸方向切込み、半径方向切込み、送り速度である。

3. 自律型工作機械の検証実験

前章で説明した工程設計・作業設計システムで決定された加工順序、使用工具、切削条件に従って、仮想加工システム^{1) 2)}が実時間で工具経路を生成して工作機械を直接制御する。このため、NC プログラムを予め作成する必要がなく、製品形状および素材形状の CAD データから、そのまま機械加工を開始することが可能となる。

また、仮想加工システムが加工中に工具経路を生成する利点を活かせば、加工状況の変化に柔軟に対応して、送り速度だけでなく切込みを加工中に更新することができる。著者らは自律的なインプロセス切削条件修正戦略³⁾を提案して、切削負荷に応じて切削条件や工具経路を変更しながら自律的な機械加工が実現できることも検証している。

検証実験では図7に示した素材形状と最終加工形状の3次元 CAD データから、工程設計および作業設計を行った。切削条件を決定する際の加工内容を表1に、マシニングセンタに準備した使用可能な工具一覧を表2に示す。

また、工程設計および作業設計の結果から予測される総加工時間と工具交換回数を表3に示す。この事例では、分割案2で総加工時間、工具交換回数ともに小さくなる。この加工工程案に対して決定された加工順序や使用工具、切削条件を表4にまとめて示す。ここに示された使用工具の Tool ID、工具経路パターン、切削条件パラメータに従って、仮想加工システムが工作機械を制御する。

図8に実験装置の概要を示す。NC 工作機械は大阪機工の立形マシニングセンタ VM4-II、NC 制御装置は FANUC の Series160i-MA である。仮想加工システムが実時間で生成する工具経路情報は、HSSB (High Speed Serial Bus) と呼ばれる高速データバスで NC 制御装置に転送される。図9に加工実験の様子を示す。これは第3工程のポケット加工の様子で、図中右下に示した加工時のモニタ映像でも分かるように、図中の左上の仮想加工システムで生成される工具経路情報に従って加工が行われている。

最後に加工結果を図10に示す。総加工時間は約38分で予測された総加工時間29.8分よりも長かったが、予め NC プログラムを作成することなく、実加工における加工トラブルも発生することなく加工を終了する事ができた。ここで加工時間が予測よりも長かったのは、工具の空走時間、工具移動に伴う加減速時間が予測値には考慮されていないためである。

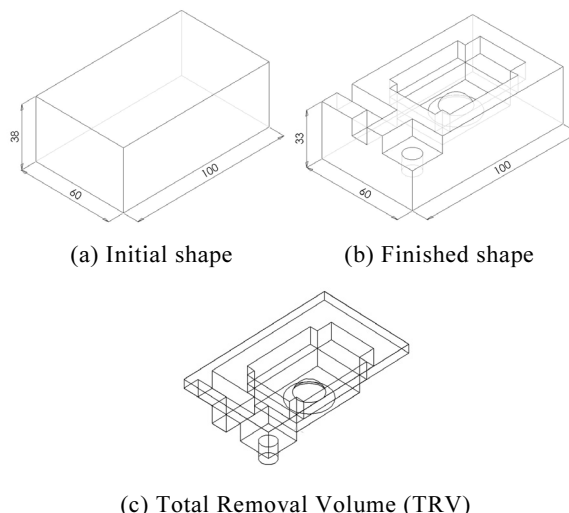


Fig.7 Machining shape for experimental verification

Table 1 Requirements to select cutting parameters

Work material		FC250
Tool	Type	End mill / Ball end mill / Face mill / Drill
	Material	Carbide
	Coating	Coated
Finish condition		Rough

Table 2 Cutting tools prepared for experiment

Tool ID	Tool type	Diameter (mm)
1	End mill	6
2	End mill	10
3	End mill	16
4	Ball end mill	6
5	Ball end mill	10
6	Face mill	80
7	Center drill	3
8	Drill	10

Table 3 Predicted productivity for each operation plan

Division plan	Productivity	
Plan 1	Cutting time (sec)	1806
	Number of tool change	8
Plan 2	Cutting time (sec)	1786
	Number of tool change	6
Plan 3	Cutting time (sec)	1805
	Number of tool change	8

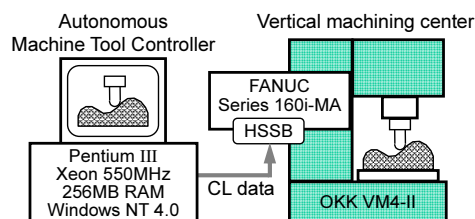


Fig.8 Experimental setup for machining operation unconstrained by NC program

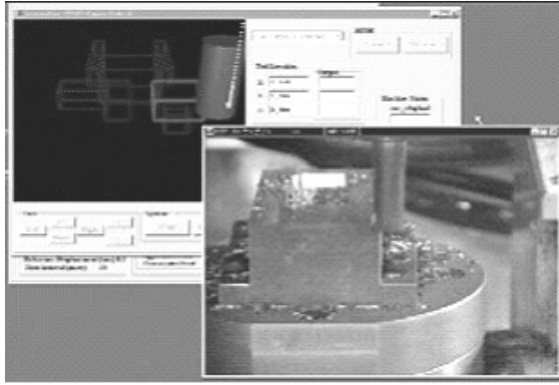


Fig.9 Experimental verification of autonomous machining operation



Fig.10 Workpiece finished by experimental machining

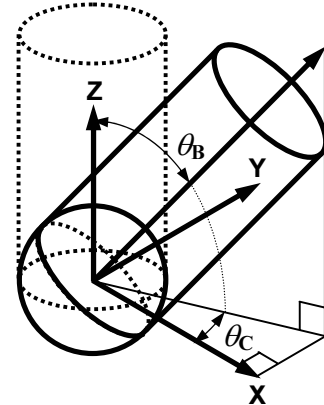


Fig.11 Tool configuration defined by θ_B and θ_C

Table 4 Results of process and operation planning for experimental machining operation

Operation sequence	1	2	3	4	5
Cutting tool, Tool path pattern	Face mill $\Phi 80$, Scanning-line mode	End mill $\Phi 10$, Contour-line mode	End mill $\Phi 16$, Scanning-line mode	End mill $\Phi 10$, Scanning-line mode	End mill $\Phi 10$, Scanning-line mode
Cutting parameters	S 1000rpm F 230mm/min RD 8.0mm AD 5.0mm	S 2450rpm F 346mm/min RD 1.6mm AD 3.8mm	S 1680rpm F 241mm/min RD 4.5mm AD 2.1mm	S 2450rpm F 346mm/min RD 1.6mm AD 3.8mm	S 2450rpm F 346mm/min RD 1.6mm AD 3.8mm
Machining feature	Face	Closed Pocket	Open Pocket	Closed Slot	Closed Slot
Machining primitive					
Operation sequence	6	7	8	9	10
Cutting tool, Tool path pattern	End mill $\Phi 6$, Scanning-line mode	End mill $\Phi 6$, Scanning-line mode	Ball End mill $\Phi 10$, Scanning-line mode	Center drill $\Phi 3$, Drilling mode	Drill $\Phi 10$, Drilling mode
Cutting parameters	S 3539rpm F 413mm/min RD 1.2mm AD 2.1mm	S 3539rpm F 413mm/min RD 1.2mm AD 2.1mm	S 2580rpm F 335mm/min RD 1.3mm AD 3.2mm	S 1154rpm F 232mm/min	S 848rpm F 180mm/min
Machining feature	Closed Slot	Open Slot	Free Form	Blind Hole	Blind Hole
Machining primitive					

4・1 工具姿勢と工作機械の定義

同時5軸制御では、並進3軸の制御に工具姿勢の2軸を加えて制御を行うが、工具姿勢の2軸は、図11に示すように基準座標系に対するロール（Z 軸まわりの回転 θ_C ）とピッチ（Y 軸まわりの回転 θ_B ）で定義する。工具姿勢は工具と工作物の干渉に配慮しながら決定すべきであるが、仮想加工による工具姿勢制御を実現することが目的であり、ここでは工具軸を加工面の法線方向に向けることで工具姿勢を決定した。

工具位置と工具姿勢が決まれば、工作機械の構造に応じた座標変換を行って、並進3軸と回転2軸の制御パラメータを決定することができる。本研究では工作機械の形状創成関数を座標変換に適用して、制御パラメータを決定した⁷⁾。実験で使用した5軸加工機は、図12に示すようなB 軸、C 軸の回転軸を有するテーブルチルト型で、形状創成関数は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \text{Rot}(Z, \theta_C) \text{Rot}(Y, \theta_B) \\ &\quad \text{Trans}(X, d_3) \text{Trans}(Y, d_4) \text{Trans}(Z, d_5) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_C & -\sin \theta_C & 0 & 0 \\ \sin \theta_C & \cos \theta_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_B & 0 & \sin \theta_B & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_B & 0 & \cos \theta_B & -a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 1 & -a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_5 + d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6) \end{aligned}$$

ここでは回転テーブル上面の中心を原点として工具位置を定義しており、図12に示したパラメータの中で、 $a_5 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$ の関係を満足する。また、2 軸回転テーブルの構造から $a_2 = 0$ となるとともに、工作機械各部の寸法から a_5 の値が決まる。

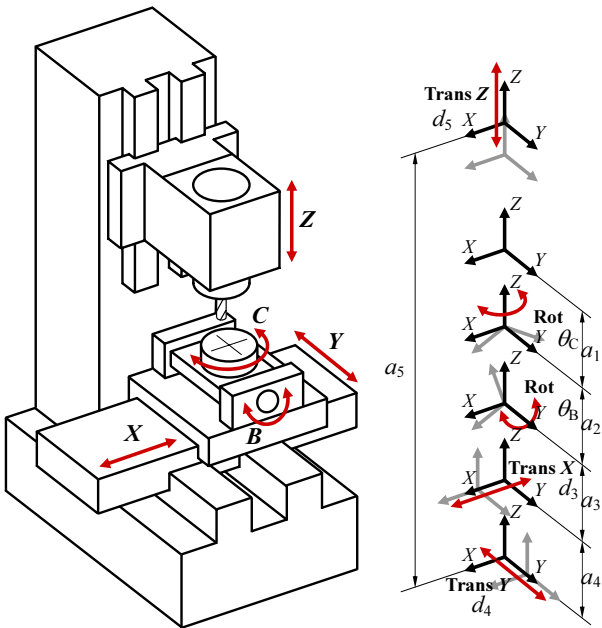


Fig.12 Schematic illustration and coordinate system of machine tool employed in this study

こうした関係を利用して式(6)を展開すると次式が得られる。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta_C \cos \theta_B & -\sin \theta_C & \cos \theta_C \sin \theta_B \\ \sin \theta_C \cos \theta_B & \cos \theta_C & \sin \theta_C \sin \theta_B \\ -\sin \theta_B & 0 & \cos \theta_B \\ 0 & 0 & 0 \\ d_3 \cos \theta_C \cos \theta_B - d_4 \sin \theta_C + (d_5 + a_5) \cos \theta_C \sin \theta_B \\ d_3 \sin \theta_C \cos \theta_B + d_4 \cos \theta_C + (d_5 + a_5) \sin \theta_C \sin \theta_B \\ -d_3 \sin \theta_B + (d_5 + a_5) \cos \theta_B - a_5 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

工具位置を示す位置ベクトル $\mathbf{P}$ は次式の p_x, p_y, p_z で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} d_3 \cos \theta_C \cos \theta_B - d_4 \sin \theta_C + (d_5 + a_5) \cos \theta_C \sin \theta_B \\ d_3 \sin \theta_C \cos \theta_B + d_4 \cos \theta_C + (d_5 + a_5) \sin \theta_C \sin \theta_B \\ -d_3 \sin \theta_B + (d_5 + a_5) \cos \theta_B - a_5 \end{Bmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

最終的に5軸加工機に指令する座標値 d_3, d_4, d_5 は、次式で求められる。

$$\begin{cases} d_3 = (p_x \cos \theta_C + p_y \sin \theta_C) \cos \theta_B - (p_z + a_5) \sin \theta_B \\ d_4 = -p_x \sin \theta_C + p_y \cos \theta_C \\ d_5 = (p_x \cos \theta_C + p_y \sin \theta_C) \sin \theta_B + (p_z + a_5) \cos \theta_B - a_5 \end{cases} \quad (9)$$

5軸加工機に指令する際には、リニアライゼーション処理が必要となるが、仮想加工システムに工具姿勢の2軸制御とポストプロセス処理の機能を付加することで5軸制御が可能となった。

4・2 リニアライゼーション

5軸加工では回転2軸の影響で工具先端位置を線形補間することができないために、工具先端位置が希望する工具経路から離れてしまうことがある。これを防止するために、リニアライゼーション処理を行う必要がある。NC プログラムを予め用意する従来のリニアライゼーション処理では、工具経路のトレランスが許容範囲に納まるように、工具経路を細分化するが、仮想加工システムの場合は、微小な時間間隔で工具経路を連続して生成しているため、回転2軸の移動量が大きい場合に、工具の姿勢変化量を細分化して工具経路のトレランスが許容範囲に納まるように制御する必要がある。

図13の例では、現在の工具位置から次の工具位置へ移動する際の工具姿勢変化が大きくオーバーカットを生じる（加工形状が凹であればアンダーカットを生じる）ことから、工具姿勢変化に関与するB 軸回転あるいはC 軸回転のどちらか一方でも回転角度変化が 1° 以上になる場合には、B 軸回転とC 軸回転の回転角度を比較して、大きい方の回転角度が 1° 未満とな

るように分割した。工具経路の精度という観点では、工具経路のトレランスが許容範囲に納まるような回転角度変化を求める必要があるが、ここでは工具経路を短時間に生成するという制約から、簡単のために回転角度変化が 1° 未満となるように分割した。

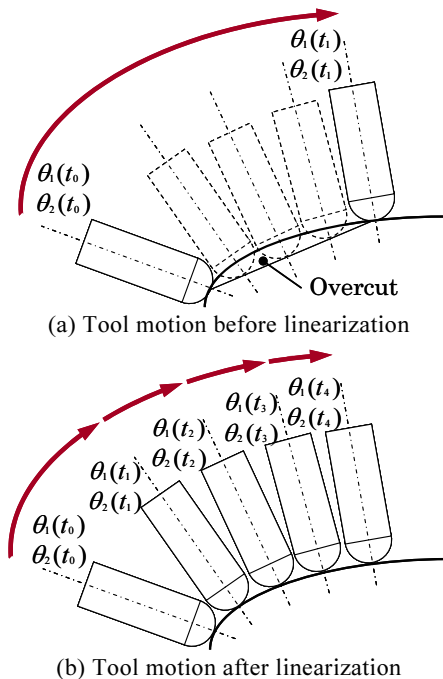


Fig.13 linearization in digital copy milling system

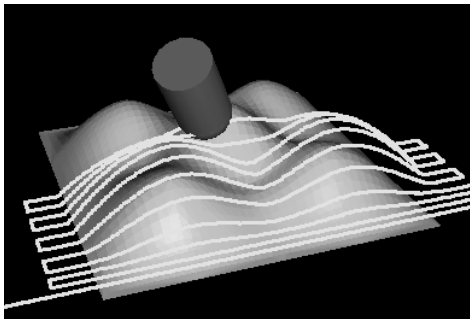


Fig.14 Tool path generation in 5-axis digital copy milling

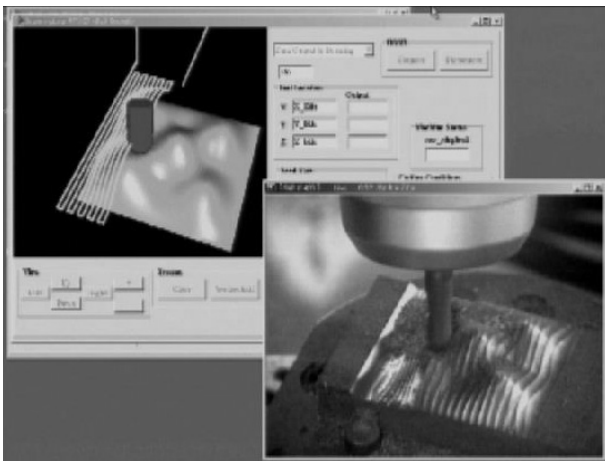


Fig.15 Experimental 5-axis digital copy milling

式(9)で示した並進移動の指令値と、B軸回転およびC軸回転の回転角度をマシニングセンタの制御パラメータとして出力することで、仮想加工による5軸制御が可能かどうかを検証するために、工具姿勢を加工面の法線方向に制御した加工実験を行った。仮想加工シミュレーションの結果は図14に示すとおりで、工具姿勢は凹凸のある加工形状の放線方向を向いている。また、加工実験の結果は図15に示すとおりで、工具姿勢を加工形状の放線方向に制御しながら加工を行うことができており、その有効性を確認した。

4・3 工具と被削材との干渉回避

5軸加工の利点は、タービンブレードのようなオーバハング部を加工できることにあるが、そのためには工具と被削材の干渉を回避しなければならない。NC工作機械を直接制御する加工システムでは、加工中に工具姿勢を短時間で決定する必要があり、常に工具と被削材の干渉をチェックしながら干渉を回避する方向に工具姿勢を変化させることにする。

干渉チェックあるいは干渉回避の方法はこれまでも提案されているが、仮想加工では加工中に工具姿勢を短時間で決定する必要があり、工具シャンク部および工具ホルダ部と被削材の干渉だけを簡便にチェックすることにする。具体的には、工具シャンク部および工具ホルダ部を覆う仮想円柱を用意し、仮想円柱と加工面（実際には加工面を表現する点群）との距離を計算することで干渉の有無を判定し、干渉が検出された場合にのみ工具姿勢を変化させて干渉を回避している。

紙面の都合で詳細な説明は省略するが、最初に仮想円柱と加工面との最大干渉量を検出し、その方向ベクトルとY軸とが垂直になるようにC軸の回転角度を決定する。このことで、B軸回転による工具干渉回避のための移動距離を最短にすることができる。次に工具傾斜のためのB軸回転角度を求める。干渉回避前の工具姿勢において検出された仮想円柱と加工面との最大干渉量から、工具中心軸と加工面との最短距離を求める。この時、工具中心軸と干渉チェックの対象となっている加工面との距離から、干渉回避前の工具傾斜角度が求められる。一方、工具中心軸と加工面の距離が仮想円柱の半径となるときに、干渉回避後の工具傾斜角度が求められる。従って干渉回避に必要な工具傾斜角度すなわちB軸回転角度は、干渉回避前後の工具傾斜角度の差として求めることができる。もちろん、工具シャンク部および工具ホルダ部が被削材と干渉しなければ、工具姿勢を変化させる必要はない。

最後に、加工実験を行って工具と被削材との干渉回避を行いながら5軸制御による加工が実時間で可能であることを検証した。図16に加工実験中の計算機画面を、図17に加工実験の様子をそれぞれ示す。加工実験では、仮想加工によって工具と被削材との干渉回

避が可能であることは検証できたが、干渉回避の工具姿勢変化に無駄が多く、5軸加工の特長を活かすためには、無駄のない工具姿勢の効率的な決定方法を開発することが必要であることがわかった。

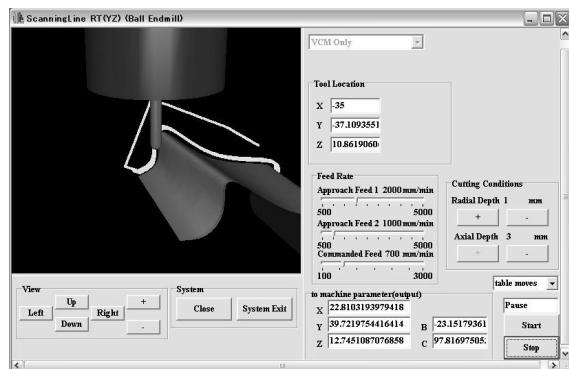


Fig.16 Collision avoidance in 5-axis digital copy milling

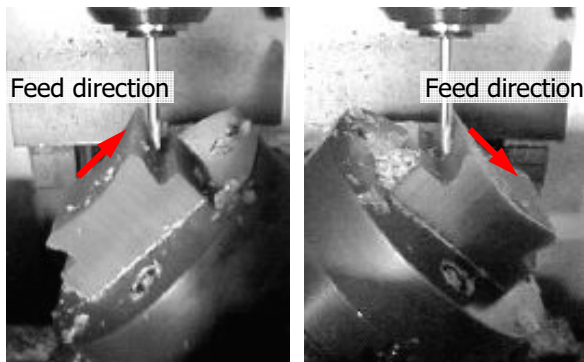


Fig.17 Experimental 5-axis digital copy milling under collision avoidance control

5. おわりに

本研究で得られた結論は以下のようにまとめられる。

- (1) 作業者の助けを借りずに自律的に機械加工を行う次世代の工作機械として、予め NC プログラムを作成する必要がない自律型工作機械を提案した。
- (2) 提案した自律型工作機械を実現するために、加工順序や使用工具、切削条件を自動的に決定するための工程設計／作業設計システムを開発した。開発した工程設計／作業設計システムでは、素材形状と最終加工形状の3次元 CAD データから加工領域を抽出し、認識された加工フィーチャから加工順序や使用工具、切削条件を決定することが可能になった。
- (3) 実証実験では素材と加工部品の3次元 CAD データに基づいて加工順序、使用工具、切削条件が決定され、10の加工工程で7種類の工具を使い分けて加工が行われ、提案した自律型工作機械の有効性を実証した。

- (4) 3軸制御の仮想加工システムに、工具姿勢の2軸制御、ポストプロセス処理、工具・被削材の干渉チェックの機能を付加して、5軸制御の仮想加工が実現できることを実証したが、工具干渉回避の工具姿勢変化に無駄が多いことも明らかとなった。5軸加工の特長を活かすためには、工具と工作物の干渉に配慮しながら、無駄のない工具姿勢の効率的な決定方法を開発することが今後の課題である。

ここに示した自律型工作機械は、予め NC プログラムを用意しなければならない既存の NC 工作機械とは異なり、加工作業の変更にも柔軟に対応できることから、自律分散型生産システムの加工設備として必要不可欠であり、これを開発した意義は非常に大きい。

最後になりましたが、(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) 白瀬敬一, 近藤貴茂, 岡本 満, 若松栄史, 荒井栄司: 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 (自律型 NC 工作機械のための実時間工具経路生成), 日本機械学会論文集(C), **66**, 644, (2000), 1368.
- 2) 中本圭一, 白瀬敬一, 若松栄史, 妻屋 彰, 荒井栄司: 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, 干渉チェックの強化と等高線加工の実現), 日本機械学会論文集(C), **67**, 663, (2001), 3656.
- 3) 中本圭一, 白瀬敬一, 若松栄史, 妻屋 彰, 荒井栄司: 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, 自律的インプロセス切削条件修正戦略), 日本機械学会論文集(C), **69**, 677, (2003), 270.
- 4) J.J.Shah : Assessment of features technology, Computer-Aided Design, **23**, 5, (1991), 331.
- 5) J.H.Vandenbrande, A.A.G.Requicha : Spatial Reasoning for Automatic Recognition of Machinable Features in Solid Models, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **15**, 12, (1993), 1269.
- 6) 長野竜也, 白瀬敬一, 若松栄史, 荒井栄司: 事例ベース推論に基づく切削条件推論システム, 精密工学会誌, **67**, 9, (2001), 1485.
- 7) 長坂 学, 竹内芳美; 形状創成関数に基づく5軸制御加工用一般化ポストプロセッサの研究, 精密工学会誌, **62**, 11, (1996), 1607

