



K. Shirase

仮想加工システムによるダイレクト金型加工

白瀬 敬一*

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自律化・知能化が遅れている。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ず、この NC プログラムの作成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。

本研究では、加工順序や使用工具、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 データから直ぐに金型加工を始めること（題目のダイレクト金型加工）が可能な自律知能型 NC 工作機械を実現した。また、この自律知能型 NC 工作機械の研究は、平成 16、17 年度の地域新生コンソーシアム研究開発事業に採択され、実証用システムを開発するとともにその効果を検証することができた。

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 Vandenbrande ら⁵⁾ によって詳細にまとめられているが、加工フィーチャや製品形状に対する制約が多い。

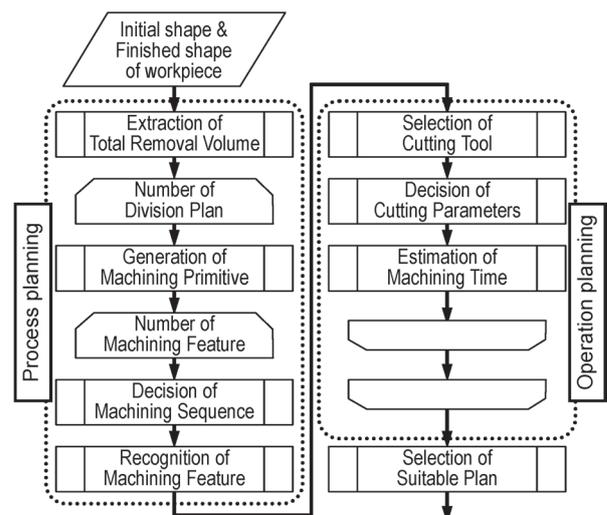
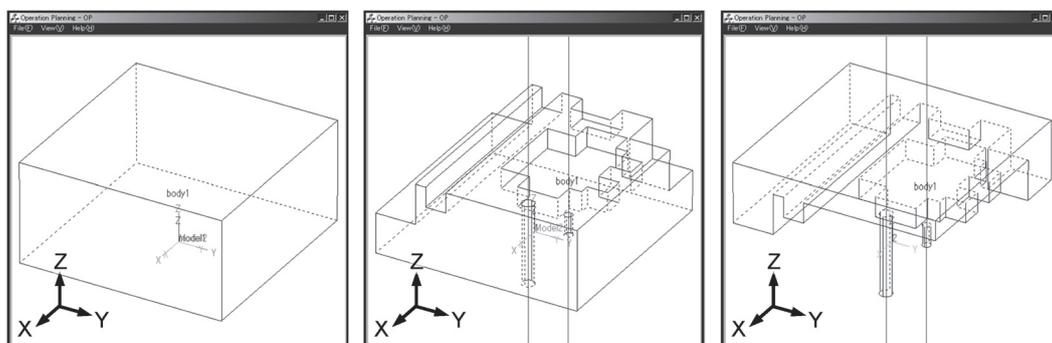


Fig. 1 Flexible process and operation planning system



(a) Initial shape of workpiece (b) Finished shape of workpiece (c) Total Removal Volume (TRV)

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

*神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻 教授

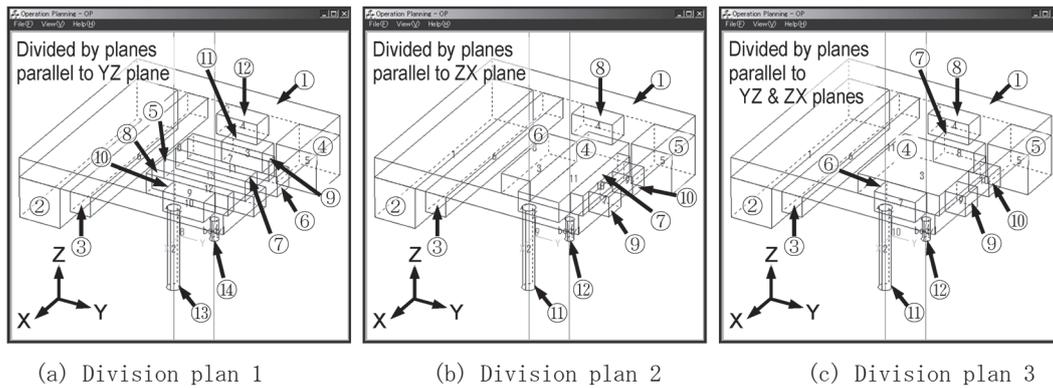


Fig.3 Machining primitives generated from TRV and machining sequence determined from geometric relation among machining primitives

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、ここ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、製品形状と素材形状との3次元CADデータから加工除去領域 (TRV : Total Removal Volume) を抽出して工程設計に利用している。図2に製品形状と素材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。

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、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種類である。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

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

具の種類が予め決めている。さらに、使用工具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5にまとめて示す。

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。

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

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。

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

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

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。 $A d_i, R d_i, F_i$ 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。

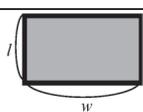
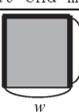
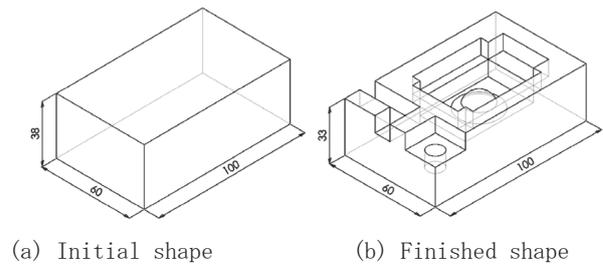
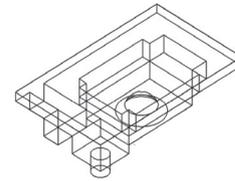
Machining feature	Selection of cutting tool	
Closed Pocket		x : Tool diameter, $1 < w$. End mill which satisfies $5x \leq l$
Open Pocket	Flat end mill which has maximum diameter	
Closed Slot		w : Width of slot. End mill which satisfies $3x \leq w$
Open Slot		w : Width of slot. End mill which satisfies $3x \leq w$
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. 5 Selection of cutting tool and its diameter for each machining feature



(a) Initial shape

(b) Finished shape



(c) Total Removal Volume (TRV)

Fig. 6 Machining shape for experimental verification

3. 自律知能型 NC 工作機械の検証実験⁷⁾

検証実験では図6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、マシン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NC工作機械を制御する。

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

Table 4 Results of process and operation planning for direct machining experiment

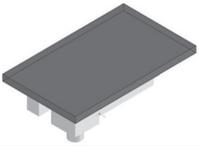
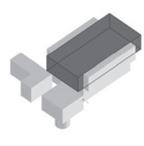
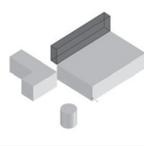
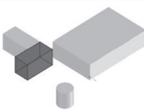
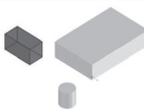
Operation sequence	1	2	3	4	5
Cutting tool, Tool path pattern	Face mill Φ 80, Scanning-line mode	End mill Φ 10, Contour-line mode	End mill Φ 16, Scanning-line mode	End mill Φ 10, Scanning-line mode	End mill Φ 10, Scanning-line mode
Cutting parameters	S 1000rpm F 230mm/min RD 8.0mm AD 5.0mm	S 2450rpm F 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 Φ 6, Scanning-line mode	End mill Φ 6, Scanning-line mode	Ball End mill Φ 10, Scanning-line mode	Center drill Φ 3, Drilling mode	Drill Φ 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					

図7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。

加工結果を図8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。

4. ダイレクトマシニングの実証実験⁸⁾

ここで提案した自律知能型NC工作機械の研究は，平成16，17年度の地域新生コンソーシアム研究開発事業に採択され，実証用システムを開発することができた。この実証用システムでは，加工手順，使用工具，切削条件を決定する工程設計/作業設計に，(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を用いた。実証用システムでは，CADソフトウェアで設計した製品形状と素材形状から，Mill-Planが自動的に工程情報（加工手順，各工程での加工領域，ツーリング，切削条件等）を作成し，仮想加工システム¹⁾²⁾が，これらの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指令を工作機械に送信することで，直

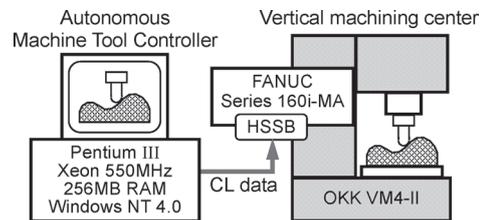


Fig. 7 Setup for direct machining experiment

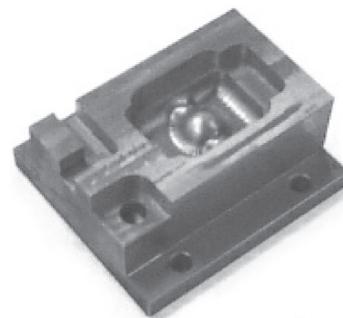
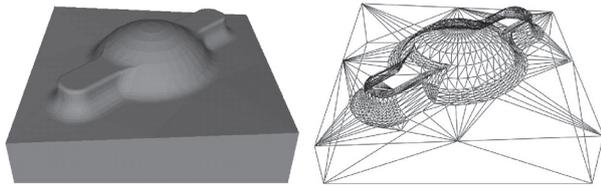


Fig. 8 Finished shape obtained by experiment

ちに加工を開始することができる。このダイレクトマシニングでは，作業が行う工程設計，CAMソフトウェアを利用したNCプログラムの作成が不要となり，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。

そこで実証システム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。



(a) Original 3D CAD data (b) STL data
Fig. 9 Target shape for practical direct machining

実験では**図9**に示した製品形状を対象とし、被削材には $60 \times 60 \times 25\text{mm}$ の NAK80 を使用した。実験装置の概要は**図7**と同様であるが、NC 工作機械は大阪機工の立形マシニングセンタ VM4-III、NC 制御装置は FANUC の Series180is-MB、計算機は Dell Precision 370 (CPU: Pentium IV 3.0GHz, RAM: 1GB) である。

Mill-Plan で作成された工程情報と、加工結果を**表5**に示す。総加工時間は 113 分 25 秒で加工中に特に問題が発生することもなく、製品形状と素材形状の 3 次元 CAD データから即座に NC 工作機械によるダイレクトマシニングが行えることが確認できた。また、この実験と比較するために、NC プログラムを作成する従来の NC 加工を行った。同一の製品形状に対して、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、総加工時間は 98 分 12 秒であった。

図10に2つの加工実験で得られた加工結果を示すが、特に大きな違いは認められない。しかし、ダイレクトマシニングの場合には工具経路が限定されるために、キャラクタラインの処理や加工形状に応じた工具経路の選択に差が認められる。しかし、従来の NC 加工では作業者

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

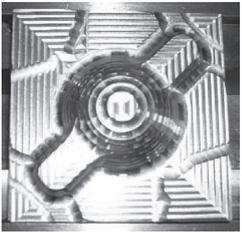
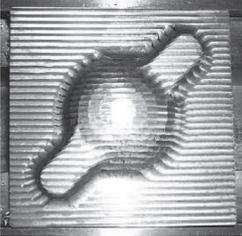
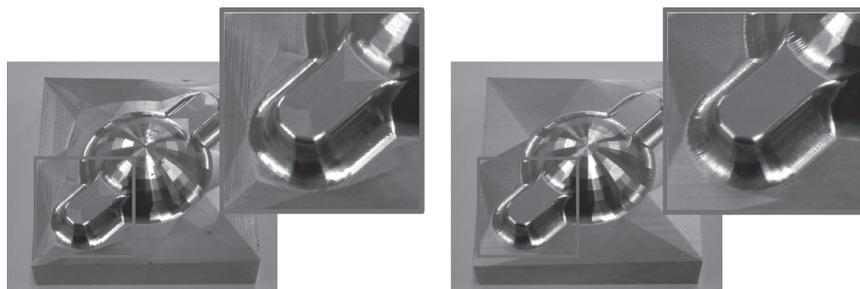
Operation sequence	1	2	3
Operation	Rough	Semi-finish	Finish
Cutting tool, Tool path pattern	Ball end mill $\Phi 8$, Contour-line mode	Ball end mill $\Phi 8$, Scanning-line mode	Ball end mill $\Phi 6$, Scanning-line mode
Spindle speed (min-1)	6000	6000	10000
Feed speed (mm/min)	1500	1500	1412
Radial depth of cut (mm)	1.8	1.8	0.1
Axial depth of cut (mm)	1.007	0.5	0.1
Cutting time (Total : 113 min 25 s)	46 min 16 s	4 min 2 s	63 min 7 s
Machining result			

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

Operation sequence	1	2	3	4	5	6	7
Operation	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 speed (mm/min)	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Radial depth of cut (mm)	3.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	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 s)	43min 4 s	1 min 13 s	6 min 35 s	4 min 36 s	3 min 5 s	18 min 52 s	20 min 47 s



(a) Conventional machining operation (b) Direct machining operation
Fig. 10 Finished shapes in practical direct machining experiment

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り、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。

5. おわりに

本研究の成果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知能型 NC 工作機械を提案した。
- (2) 提案した自律知能型 NC 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、製品形状と素材形状の 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) ダイレクトマシニングの実証実験では、製品形状と素材形状の 3 次元 CAD データに基づいて加工順序、使用工具、切削条件を決定して即座に機械加工が実現できることを確認し、その有効性を実証した。

ここに示した自律知能型 NC 工作機械は、予め NC プログラムを用意して工具経路や切削条件を限定してしまう既存の 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る。また、自律知能型 NC 工作機械では、予め工具経路や切削条件を決定する必要がないので、加工プロセスの適応制御や加工トラブルの回避など、既存の NC 工作機械では考えられない新たな機能を実現することができる。

謝 辞

(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。また、平成 16、17 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業の助成に対して、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。

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) 白瀬敬一, 中本圭一, 荒井栄司, 森脇俊道; NC プログラムを必要としない自律型工作機械—工程設計および作業設計の自動化によるダイレクトマシニング, 精密工学会論文集, 70, 11, (2004), 1449.
- 8) 白瀬敬一, 中本圭一; 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, 日本機械学会論文集 (C), 74, 743, (2008), 1901.