5 軸制御工作機械のための 工程設計支援システムの開発（第 1 報）*

—ボクセルモデルを利用した除去領域の算出と工具経路の生成による工具姿勢の決定—

中本圭一** 稲岡孝彬*** 白瀬敬一** 森脇俊道†

Development of a Process Planning System for 5-axis Controlled Machine Tool (1st Report)
- Determination of Tool Posture by Estimating Removal Volume and Cutting Time Based on Voxel Model -

Keiichi NAKAMOTO, Takaaki INAOKA, Keiichi SHIRASE and Toshimichi MORIWAKI

5-axis control milling is adopted to manufacture valuable parts in such fields as aerospace, automotive and die/mold industries. However, it takes extensive amount of time and efforts to determine the process planning parameters by skilled engineers because the machining process is much complicated. On the other hand, 3+2-axis control milling is often operated for high efficient milling on a 5-axis controlled machine tool. Machining accuracy can be improved and tool trajectory becomes simple in 3+2-axis control milling. However, it is still difficult to determine the effective tool posture automatically. Therefore, a calculation method of removal volume at each tool posture is proposed. Free-form surfaces are focused on target shapes because it is difficult to recognize machining features. In order to compare the machining efficiency, the cutting time is estimated by generating tool paths at each tool posture in this study.

Key words: 5-axis controlled machine tool, process planning, 3+2-axis control milling, voxel model, removal volume, tool posture, tool path generation, mold and die

1. 緒 言

多品種少量生産化が進む機械加工において、非加工時間となる工程設計の標準化・自動化の達成が求められている。このためには、加工対象形状、加工機、ジグ、工具、加工条件など数多くの組合せの中から加工プロセスを予測し、高能率な工程設計案を高速に提示できる支援システムの開発が必要である。

工程設計の自動化を指向した取り組みとして、製品形状から加工方法を特徴付ける形状である加工フィーチャを認識することが従来から考えられてきた^{1)~4)}。しかしながら、製品形状として金型構造部などのように比較的単純な幾何形状の組合せを対象としており、自由曲面などの複雑形状については未だに十分な対応ができていない。また、3 軸制御工作機械による加工を前提としており、近年導入が進んでいる 5 軸制御工作機械により加工することは考慮されていない。

5 軸制御工作機械では、被削材に対して任意の工具姿勢を取ることで、加工面品質の向上、工具の長寿命化、段取り替えの省略が期待でき、高能率な加工が実現できる反面、工具姿勢に自由度が存在するために、工程設計は複雑となる。ポケットや溝、穴などの形状は加工フィーチャとして認識し、工具姿勢を一意に決め得るが、自由曲面形状に対しては、取り得る工具姿勢の中から適切な姿勢を合理的、自動的に選択する必要がある。またこのとき、不適切な干渉が発生しないように使用するツーリングなども注意深く選定する必要がある。

5 軸制御工作機械による自由曲面形状の加工を目的にして、既に幾つかの工具姿勢決定方法が提案されている^{5)~9)}。森重らは工具姿勢と干渉の有無を把握するために生成した 2 次元の

C-Space に基づいて、同時 5 軸制御加工法による仕上げ加工を対象とした工具姿勢決定方法を提案している^{9)~9)}。また山田らは、回転 2 軸で予め工具姿勢を決定し、3 軸制御加工を行ういわゆる 3+2 軸制御加工法において、工具姿勢（割り出し角）決定方法を提案している^{7)~9)}が、製品形状に対する加工可能面積を基に姿勢を決定しており、これも仕上げ加工を対象としたものと考えられる。これらに対して、鈴木らは 3+2 軸制御加工法による荒加工時の工具姿勢を決定している⁹⁾が、製品形状を YZ, ZX 平面に投影し、この 2 平面内に取り得る工具姿勢を限定している。このように、工具姿勢決定に関する従前の研究は、仕上げ加工を対象としたものが多く、その前段階として重要な工程である荒加工を対象とした取り組みは非常に少ない。また、3 次元複雑形状を対象として加工工程、ツーリング、切削条件を自動決定できる工程設計支援システム「Mill-Plan」が既に開発されている¹⁰⁾が、これは工具姿勢が一定の 3 軸制御工作機械による加工を前提としている。

そこで本研究では、加工フィーチャの認識が困難な自由曲面など複雑形状の 3+2 軸制御加工に着目して、荒加工から仕上げ加工までの全工程に対応した、工具姿勢（割り出し角）およびツーリングの組合せを決定する方法の確立を目指す。そして、高付加価値製品の加工準備時間を短縮し、5 軸制御工作機械の特長である工具姿勢の自由度を有効に活用した、高能率な機械加工を達成することのできる、5 軸制御工作機械のための工程設計支援システムの開発を目的とする。

本報では、開発する工程設計支援システムの基礎として、ボクセルにより製品形状と被削材形状を表現し、3+2 軸制御加工法での各工具姿勢において、各ツーリングによる除去領域を簡便に算出する手法を示す。また、除去領域内に工具経路を生成して加工時間を予測することにより、効率の良い工具姿勢を決定する試みについて述べる。

* 原稿受付 平成 18 年 12 月 25 日

** 正 会 員 神戸大学大学院工学研究科(神戸市灘区六甲台町 1-1)

*** 任天堂株式会社(京都市南区上鳥羽鉾立町 11-1)

† 正 会 員 摂南大学 工学部(大阪府寝屋川市池田中町 17-8)

Fig. 1 3+2-axis control milling on 5-axis controlled machine tool

2. 3+2 軸制御加工

5 軸制御工作機械を用いる場合、工具姿勢の自由度を有効に利用する加工法は、同時 5 軸制御加工法と 3+2 軸（簡易 5 軸、固定 5 軸）制御加工法の 2 方法が考えられる。インペラ等の加工に利用される同時 5 軸制御加工法は、5 つの駆動軸を同時に使用しながら加工を行うのに対して、図 1 に示す 3+2 軸制御加工法では、予め回転 2 軸で工具姿勢を決定し、加工中には直交 3 軸のみ使用する。どちらも工具姿勢に自由度が存在するため、被削材とツーリングとの干渉回避が容易となる。また、切削速度が極めて遅くなる工具回転中心を避けて加工することが可能となり、工具の長寿命化・加工面性状の向上が期待できる。さらに、工具の突き出し長さを短くすることで切削負荷に対して工具剛性を高く保つことが可能となり、びびり振動を抑制しつつ加工条件をより厳しく設定できるため加工効率を向上させることができる。

2 つの加工法を比較した場合、同時 5 軸制御加工法の加工動作は複雑となり、NC プログラムの生成とその検証は一般的に困難となる。また、同時に駆動する軸数が多く運動精度、機械剛性を高く保つには不利となる。一方、3+2 軸制御加工法は、5 軸制御工作機械の特長である工具姿勢の自由度を保持しつつ、加工中には回転 2 軸を機械的に固定することで運動精度、機械剛性を確保しやすくなる。また、従来の 3 軸制御加工で培われた工具経路生成および加工条件選定等のノウハウを継承して、簡便に高能率加工の実現が期待できる。しかしながら、3+2 軸制御加工においてその成否を左右する工具姿勢（割り出し角）の効果的な決定方法は確立されておらず、現状では技術者の経験に基づいて試行錯誤的に行われている。

そこで本報では、5 軸制御工作機械による高能率な機械加工を実現するために、3+2 軸制御加工法における適切な工具姿勢を被削材形状、製品形状、ツーリングおよび除去領域の各情報を考慮して自動的に決定することを目指す。なお、上述したように山田らは、製品形状とツーリング情報を利用して仕上げ加工を対象とした工具姿勢（割り出し角）決定方法を既に提案している⁷⁻⁹⁾が、5 軸制御工作機械を中仕上げ・仕上げ加工に限り利用することは非効率的であり、加工精度の点からも荒加工から仕上げ加工までを同一機上で行うことが望ましい。また、3+2 軸制御加工法は比較的高い機械剛性を確保して加工できるため荒加工にも適しており、以上の理由から本研究では荒加工から仕上げ加工までの全工程に対応できる方法を考案する。5 軸制御工作機械上で従来の 3 軸制御加工により荒加工を行うことも考えられるが、これは 3+2 軸制御加工法の一部に過ぎず、このときの工具姿勢が最適である保証はない。

Fig. 2 Hierarchical octree data structure

(a) Representation of tooling (b) Swept volume of cutting edge part
Fig. 3 Swept volume of tooling for interference and collision check

3. 各工具姿勢における除去領域の算出

3.1 ボクセルによる形状表現

従来から、機械加工シミュレーションにおける被削材等の形状表現にボクセルを利用することで、被削材と工具間の干渉量を高速に検出することが考えられている¹¹⁾。また、検出された干渉量を用いたオフセット面の生成¹²⁾や切削力の予測¹³⁾についても既に研究されている。本研究においても、複雑形状を境界面だけでなく内部の物性も含めて表現でき、有限要素解析や計測情報とのモデルの一元化に優位な点を考慮して、製品形状と被削材形状の表現にボクセルを採用した。

ボクセルによる形状表現は、直接的で理解しやすいものの物体を高精度に表現する場合には、非常に多くのメモリが必要になる。そこで本研究では、ボクセルをOctree構造とすることで、メモリの消費量を抑えることとした。図 2 には例として、被削材を表す立方体の 1 つの頂点付近が加工により取り除かれた様子と合わせて、そのときに保持しているデータの関係を示している。このように Octree 構造では、微細な形状部分は Octree の階層を深くして小さなボクセルで表現し、複雑でない形状部分は階層の浅い大きなボクセルで表現することで、メモリを効率的に使用できる。また、利用する階層を容易に変更できるため、所望の精度で物体を表現でき、荒加工から仕上げ加工に至る加工工程を通じて被削材を表現することに適している。

除去領域を算出する方法として、岸浪らは工具掃引形状もボクセル表現し、被削材を表すボクセルとの論理演算により求めることを提案している¹⁴⁾が、ホルダなども含めた干渉チェックを詳細に行う場合には膨大なボクセルが必要となることが予想される。中村らも同様にボクセル表現された工具形状により、離散相互相関関数を用いて干渉を判断しているが、Octree 構造を利用するのが困難で、中間値を用いて精度の維持を図っている¹⁵⁾。金子らは後述する本研究の手法と同様に工具掃引形状を幾何学的に定義しているが、ボールエンドミルによる 3 軸制御加工以外への対処については言及されていない¹⁶⁾。また、Ratchev らは比較的大きなボクセルを用い、工具と干渉した場合に様々な多面体へ分割して除去領域を算出しているが、アルゴリズムが複雑であり、単純な加工結果しか示されていない¹⁴⁾。

Table 1 Swept volume parts of cylinder and sphere

	Pattern	Swept volume parts
Cylinder	C1	
	C2	
	C3	
Sphere	S1	
	S2	

3.2 ツーリングの掃引形状

本研究では、使用する工具にスクエアエンドミルとボールエンドミルを想定し、工具切れ刃部、シャンク部、ホルダ部を含むツーリングと、被削材形状および製品形状との干渉チェックを行うことで、各工具姿勢での除去領域を算出する。図 3(a)には、本研究で定義したツーリング形状の例を示すが、工具にボールエンドミルを想定した場合、切れ刃部の先端は球で表現され、その他の部位は円柱により表現される。また、スクエアエンドミルの場合には、球は用いず円柱のみで表現される。しかしながら、このように表現されたツーリングの位置を微量ずつ変化させ、その都度干渉チェックを行うと計算負荷が増大する。このため本研究では、ツーリングの送り方向への掃引形状と被削材形状および製品形状との間で干渉チェックを行うことを考えた。ここで例として図 3(b)に示した掃引形状は、図 3(a)に示したツーリングの工具切れ刃部分の掃引形状である。

なお現状では、球あるいは円柱で定義されたツーリングによる干渉チェックのみ取り扱っている。テーパ付ホルダやテーパシャンク工具等を忠実に表現するには円錐台等の形状を準備する必要があるが、これは今後の課題である。

球と円柱により表現されたツーリングの掃引形状は、表 1 に示す 5 種類の要素形状の和となる¹⁵⁾。なお、表 1 内に例示した各要素形状は図 3(b)の掃引形状を構成している。円柱部の掃引開始位置と終了位置に対応する要素形状がパターン C1 (以後はパターンを省略) であり、円柱部の軸方向断面である長方形により掃引された領域に対応する要素形状が C2、同様に円柱両端の円により掃引された領域は C3 となる。またボールエンドミル先端を表す球の場合には、球の掃引開始位置と終了位置に対応する S1 と、球断面の円により掃引される領域に対応する S2 の 2 種類の要素形状が考えられる。本研究では、これら 5 種類の要素形状それぞれに対し、被削材形状と製品形状を表すボクセルとの干渉チェック手法を考案し、除去領域を算出できるようにした。

Fig. 4 Flowchart of calculation method of removal volume

Fig. 5 Collision detection in case of S1

3.3 要素形状とボクセルの干渉チェック

ツーリングの掃引形状を利用した除去領域算出手順は、シャンク部とホルダ部 (工具切れ刃部以外のツーリング) の掃引形状と被削材形状間の衝突検出、工具切れ刃部の掃引形状と製品形状間の衝突検出、および工具切れ刃部の掃引形状と被削材形状間の除去検出の 3 つの処理に大別される。この除去領域の算出手順をフローチャートにして図 4 に示す。1 番目と 2 番目の処理である衝突検出部では、ツーリングが掃引する領域が加工に適切かどうかを確認し、不適切な干渉が検出された場合には除去検出部の処理は行わず、次のツーリング掃引形状の衝突検出を行う。加工に適した掃引領域であった場合には、除去検出部において工具切れ刃と干渉している被削材形状を構成するボクセルを検出し、加工でき得る除去領域を算出する。

衝突検出部および除去検出部においては、3.2 節で示した各要素形状とボクセルとの干渉チェックが行われる。この例として、最も単純な要素形状である S1 での手法を示す¹⁵⁾。要素形状 S1 において球の半径を R_b 、球の中心とボクセル中心 C との距離を d_b とすると、次式を満たす場合に要素形状 S1 とボクセルが干渉する可能性がある。

$$d_b < r_b + d_v \quad (1)$$

このときの要素形状とボクセルの関係を図 5 に示すが、ここで d_v はボクセルの中心 C とボクセルの各頂点までの距離である。式(1)を満たす場合、ボクセルは予め定められた階層に至るまで分割される。さらに、次式を満たして完全に要素形状にボクセルが包含される場合は、衝突検出部においては不適切な干渉の存在を認識し、除去検出部においてはそのボクセルを除去領域として認識する。

$$d_b < r_b - d_v \quad (2)$$

除去領域を算出する際、ツーリング掃引形状を導出するため

(a) Product shape (b) Workpiece shape
Fig. 6 Targeted product model and rectangular solid as workpiece

Fig. 7 Definition of tool posture

Table 2 Tooling specification assumed in case studies

Cutting tool	Type	Tooling I	Tooling II
		Square	Ball
	Diameter	16 mm	8 mm
	Length of edge	32 mm	14 mm
	Shank diameter	16 mm	8 mm
	Length of shank	32 mm	26 mm
	Overhang (L/D)	4	5
Tool holder (upper cylinder)	Diameter	100 mm	64 mm
	Length	60 mm	30 mm
Tool holder (lower cylinder)	Diameter	52 mm	32 mm
	Length	40 mm	32 mm

の仮の工具経路を生成する必要があるが、本研究では被削材形状を網羅する走査線状の工具経路を切込み量、ピックフィードが共に工具半径以下となるように予め生成している。また上述した衝突検出部において干渉が検出された場合、掃引距離を半分にし、掃引形状を分割して再度衝突検出を行うが、これは掃引距離が工具半径を下回るまで再帰的に行っている。

3.4 ケーススタディ

考案した干渉チェック手法の有効性を確認するために 2 種類のケーススタディを行った。想定した製品形状と被削材形状を図 6 に示す。製品形状は三次元 CAD で設計した自由曲面形状で、高さ 20 mm の土台に対して 2 辺に幅 20 mm 高さ 60 mm のフィレットを施した壁形状を作成し、中央部は最大高さ 80 mm の凸形状としている。また、製品形状を表現するボクセルの一边の長さは 1 mm、被削材形状を表すボクセルは一边 1.56 mm を最小とした。図 7 に示した被削材座標系において工具姿勢を定義する 2 つの角度 α ($0 \leq \alpha \leq 90$) と β ($0 \leq \beta \leq 360$) は 10 deg. ごとに変化させ、各工具姿勢において除去領域を算出した。ケーススタディを行うために使用した計算機の CPU は Pentium Xeon 3.6 GHz であり、2 GB のメモリを搭載している。ケーススタディ I および II で想定した、使用工具を含むツーリングの諸元は表 2 に示した通りである。

ケーススタディ I では工具にスクエアエンドミルを使用し、直方体の素材形状からの荒加工を想定した。図 8 には、被削材形状と製品形状の体積の差である目標除去体積に対して、各工具姿勢において算出した除去領域それぞれの体積の割合を除去可能率として示す。また、除去可能率が最大の 76.1 % となる工具姿勢 $[\alpha, \beta] = [30, 230]$ において加工後の被削材形状を図 9 に示

Fig. 8 Calculated removal volume in case study I

Fig. 9 Finished workpiece (Tooling I, $\alpha: 30$, $\beta: 230$) in case study I

Fig. 10 Calculated removal volume in case study II

Fig. 11 Finished workpiece (Tooling II, $\alpha: 30$, $\beta: 300$) in case study II

す。このとき、全工具姿勢で除去領域を計算するために要した時間は約 3 分であった。図 8 から、Z 軸からのツーリングの傾斜角 α が 50 deg. より小さい範囲は、比較的加工しやすい工具姿勢であり、特に α が 30 deg. で除去体積を大きくできる工具姿勢となることが分かる。また、+Y 側と -X 側の端部に壁状に盛り上がった製品形状のため、 α が大きくなるとツーリングの傾斜方向を表す角度 β が 90 から 180 deg. のとき、除去体積が極めて小さくなっている。このケーススタディでは、従来の 3 軸制御加工での工具姿勢 $[\alpha, \beta] = [0, 0]$ では除去可能率が 68.0 % であり、これよりも除去体積が大きい工具姿勢は 122 通り存在した。

次に使用工具にボールエンドミルを想定し、各工具姿勢における除去領域を算出するケーススタディ II を行った。ここで被削材形状は、前工程で加工が行われた形状を想定し、図 9 に示

Table 3 Cutting conditions of tooling II

Tool	2 flutes, WC ball end mill, R4
Workpiece	Carbon steel
Spindle speed	6400 min ⁻¹
Feed	360 mm/min
Depth of cut	2 mm
Pickfeed	2 mm

した形状とした。ケーススタディ I と同様に、各工具姿勢で算出した除去可能率を図 10 に、除去可能率が最大の 46.4 % となる工具姿勢 $[\alpha, \beta] = [30, 300]$ において加工後の被削材形状を図 11 に示す。工具姿勢 $[\alpha, \beta] = [0, 0]$ において除去可能率は 36.1 % であり、これよりも除去体積が大きい工具姿勢は 42 通り存在した。また、ツーリングの傾斜角 α に関わらず、 β が 290 から 340 deg. の工具姿勢では比較的高い除去可能率が得られた。ケーススタディ II では、全工具姿勢での除去領域算出に約 11 分必要であったが、これはケーススタディ I と比較して想定した工具径が小さく、干渉チェックを行うために導出されるツーリング掃引形状が増加することが要因である。

これらのケーススタディより、3+2 軸制御加工における各工具姿勢での除去領域が簡便に算出できることで効果的な工具姿勢を決定するための重要な情報が得られること、前工程で加工済みの複雑な被削材形状からも除去領域が算出できることで開発を目指す工程設計支援システムの基礎として有効であることが確認できた。

4. 除去領域内の工具経路生成

4.1 ボクセルを利用した工具経路生成手法

考案した除去領域算出手法を利用して適切な工具姿勢を決定し、工程設計支援システムの開発を目指すためには、算出された除去領域の加工時間を予測することが必要となる。最も簡便には、各ツーリングに対応する切削条件より単位時間当りの加工体積を求めて、除去領域の体積を除すことで加工時間が算出できるが、本研究ではより高精度に予測するため除去領域内に工具経路を生成し、その工具経路を基に加工時間を計算することとした。このとき、工具経路は等高線状の経路を基本として採用し、除去領域を構成するボクセルを利用して簡便かつ高速に生成することを目指した。

本研究で実現した等高線工具経路の生成手法は、主に以下の 3 つの処理に大別される。まず、除去領域をピックフィードと切込み量を考慮して決定した単一の大きさのボクセルで表現する。このとき新たに除去領域を表現するボクセルが、Octree 構造により詳細に表現するための小さなボクセルにより全部満たされる場合には除去領域として扱い、一部のみに満たされる場合には除去領域としては扱わない。これにより製品形状と除去領域が

Fig. 13 Obtained removal volume in case study III

(a) Tool path in section (A)

(b) Tool path in section (B)

Fig. 14 Generated tool paths in obtained removal volume

干渉することを防ぐ。次に、図 12(a)に示したように、XY 平面上で除去領域の最外周にあるボクセルから除去領域の中央に向かって順に各ボクセルの番号付けを行う。最後に、同じ番号が設定されたボクセルの中心を結び、1 つの平面内での工具経路を生成する。このとき、図 12(b)において斜線で示すような製品形状に隣接するボクセルは、複数回の接続を可能として削り残しが発生しないようにしている。なお、切削様式がダウンカットとなるように工具経路は右回りの渦巻形とし、図 12(b)に示した工具経路内の太線は、工具が 2 回通過する経路を表している。これらの処理を各加工面で繰り返すことで、目標とする製品形状を加工するための等高線工具経路を生成する。加工時間は工具経路の全長と送り速度の関係から単純に算出するのではなく、コーナー部では一定の加速度で加減速すると仮定して、このための時間も考慮している。

4.2 ケーススタディ

ケーススタディとして図 6 に示す製品形状、被削材形状において、除去領域の体積が最大となる工具姿勢での工具経路を生成した。ツーリングは表 2 に示した Tooling II を用いたが、参考とした切削条件は、表 3 にまとめたように工具を 2 枚刃超硬ボールエンドミル、被削材を炭素鋼と仮定した場合にカタログで推奨されている条件を採用し、ピックフィードと切込み量は共に 2 mm とした。製品形状と被削材形状を表すボクセルの大きさ、工具姿勢の分解能に関しては 3 章のケーススタディと同じ条件とした。

Fig. 15 Cutting time estimated from generated tool paths

図 13 には体積が最大となる工具姿勢での除去領域を示す。このときの工具姿勢は $[\alpha, \beta]=[30, 320]$ であり、除去可能率は 88.6 %であった。3 章のケーススタディ I と製品形状と被削材形状は同じであるが、違うツーリングを利用したことで、除去可能率が最大となる工具姿勢、およびその除去体積は異なる結果が得られている。除去領域内で生成した工具経路の例として、図 13 に(A), (B)で示した 2 つの加工面での工具経路を図 14 に示す。なおここで言う加工面とは、ボールエンドミル先端の半球中心が通過する XY 平面であり、(A), (B) それぞれの被削材底面からの高さは 88, 70 mm である。製品形状の高さは最大で 80 mm であるため、加工面(A)ではツーリングと製品形状が衝突することはない、点線で囲まれた被削材断面全体が除去領域に含まれる。従って、図 14(a)に示すように工具経路は被削材の断面中心まで生成されている。また加工面(B)では、被削材断面の +Y 側と -X 側の端部および中心部分で製品形状とツーリングの衝突が発生して不適切な加工となるため、図 14(b)内に点線で囲んで示したように製品形状を避けた除去領域内に工具経路が生成されていることが分かる。

全工具姿勢において除去領域を算出し、工具経路を生成して加工時間を予測した結果を図 15 に示す。このときの計算時間は約 82 分であり、除去可能率が最大となる工具姿勢 $[\alpha, \beta]=[30, 320]$ での加工時間は約 16.6 時間と予測された。表 3 に示したように送り速度を 360 mm/min. と低速に設定しているため加工時間は比較的長くなっている。従来の 3 軸制御加工での工具姿勢 $[\alpha, \beta]=[0, 0]$ では、除去可能率は僅かに低い 88.4 %であったが、加工時間が約 17.3 時間と長くなっており、除去体積を加工時間で除した加工効率は低い結果となった。なお、工具姿勢 $[\alpha, \beta]=[30, 320]$ における加工時間は単純に切削条件に依存する単位時間当たりの加工体積で除去体積を除して得た加工時間に比べ約 0.25 時間長い結果であった。

全ての工具姿勢において本研究で得られた除去体積および加工時間から加工効率を算出すると、除去体積が非常に小さい場合に加工時間が極端に短くなり結果として加工効率が高くなることもある。そこで全 325 通りの工具姿勢の中で除去可能率が 50 %を超える 217 通りについて加工効率を算出すると最も加工効率が高い工具姿勢は $[\alpha, \beta]=[50, 340]$ であった。また、このとき工具姿勢 $[\alpha, \beta]=[30, 320]$, $[0, 0]$ の加工効率はそれぞれ 12 番目, 175 番目という結果となった。

突き出しの長い小径の工具を用いて加工を行った場合、目標とする加工領域のほとんどを 1 組のツーリングで除去できるが、加工時間は長くなる。一方、大径の工具を含む複数のツーリングを組合せることで、加工時間を短縮することが可能となり、効率的な 3+2 軸制御加工が実現できる。今後はここで開発した各工具姿勢での除去領域の算出手法と除去領域内の工具経路生

成に基づいた加工時間予測を利用して、複数のツーリングを考慮した工程設計支援システムの開発を目指す。

5. 結 言

5 軸制御工作機械の特長である工具姿勢の自由度を有効に活用した 3+2 軸制御加工に着目し、加工フィーチャの認識が困難な自由曲面など複雑形状を対象に、工具姿勢(割り出し角)およびツーリングの組合せを決定するための基礎的な研究を行い、以下の結果を得た。

- (1) ボクセルにより製品形状と被削材形状を表現し、3+2 軸制御加工法での各工具姿勢において、各ツーリングによる除去領域を算出する手法を考案した。
- (2) 除去領域を構成するボクセルを用いて簡便に工具経路を生成して加工時間を予測する手法を考案した。
- (3) 上記の除去領域算出手法、工具経路生成による加工時間予測に関するケーススタディを行い、工程設計支援システムの基礎として両手法が有用であることを確認した。

本研究により、各ツーリングでの工具姿勢ごとの除去領域、加工時間および加工効率が予測できるようになったが、効果的な工具姿勢を自動的に決定するためには、使用するツーリング、前後の工程、割り出し回数等も合わせて考慮する必要がある。また、削り残しが発生しないツーリングの組合せを選定することは必須であり、これらは工程設計支援システムの開発を目指す上で、今後の課題となる。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(B) 17360063)により行われたことをここに記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 杉村延広: 工程設計システムの現状と将来, 精密工学会誌, **72**, 2 (2006) 165.
- 2) Y. Woo, et al.: A Hybrid Feature Recognizer for Machining Process Planning Systems, *Annals of the CIRP*, **54**, 1 (2005) 397.
- 3) Y. Woo, et al.: Recognition of Maximal features by Volume Decomposition, *Computer-Aided Design*, **34**, (2002) 195.
- 4) 白瀬敬一 他: 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—, 精密工学会誌, **70**, 11 (2004) 1449.
- 5) 森重功一 他: C-Space に基づいた 5 軸制御加工における工具姿勢の決定法—工具形状を考慮した C-Space の生成と安全第一戦略—, 精密工学会誌, **66**, 7 (2000) 1142.
- 6) 森重功一 他: 加工面全体における工具姿勢変化の連続性を考慮した 5 軸制御加工用工具経路生成法, 精密工学会誌, **72**, 5 (2006) 652.
- 7) 山田 誠 他: 5 軸 NC 工作機械による主軸傾斜曲面加工法に関する研究 (第 1 報)—高能率金型加工のための最適割り出し角自動決定方法—, 精密工学会誌, **70**, 1 (2004) 65.
- 8) 山田 誠 他: 5 軸 NC 工作機械による主軸傾斜曲面加工法に関する研究 (第 2 報)—複数回の傾きを必要とする形状に対する割り出し角列決定方法—, 精密工学会誌, **71**, 12 (2005) 1613.
- 9) 鈴木 裕 他: 5 軸加工用 CAM システムの開発, 精密工学会誌, **60**, 6 (1994) 832.
- 10) 今田智秀 他: 次世代型加工設計支援システム「Mill-Plan」の機能と概要, 型技術, **16**, 3 (2001) 71.
- 11) 岸浪建史 他: Voxel 表現法の機械加工シミュレータへの応用, 精密工学会誌, **55**, 1 (1989) 105.
- 12) 中村 隆 他: 相互相関関数による工具オフセット計算とレリーフ模型の作成, 精密工学会誌, **59**, 11 (1993) 1809.
- 13) 金子順一 他: エンドミル加工の切削抵抗予測を指向した被削物形状評価手法—工具掃引体の概念を用いた切込深さの推定—, 精密工学会誌, **72**, 2 (2006) 229.
- 14) S. Ratchev et al.: Material Removal Simulation of Peripheral Milling of Thin Wall Low-rigidity Structures Using FEA, *Advances in Engineering Software*, **35**, (2004) 481.
- 15) K. Nakamoto et al.: A Study on Calculation Method of Machined Volume for Process Planning in 3+2-Axis Control Rough Milling, *Proceedings of 2006 International Symposium on Flexible Automation* (2006) 11.