

研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2006～2008
課題番号：18360065
研究課題名（和文） 製造高度化のための複雑曲面形状からの特徴抽出
研究課題名（英文） Feature Extraction from Complex Curved Shape
for Automating Machine Production
研究代表者
乾 正知（INUI MASATOMO）
茨城大学・工学部・教授
研究者番号：90203215

研究成果の概要：

日本の機械製造業を強化するためには、金型製造の工程設計自動化や知能化が重要である。このような高度な工程設計を実現するには、加工方法や工具選択などに影響する特徴的な形状を自動的に抽出し、工程設計者にビジュアルに示す機能を用意する必要がある。本研究では、このようなフィーチャ抽出に関する、以下の技術の実現に成功した。

- （1）加工に関する特徴抽出に適した3方向デクセルに基づく立体形状の表現。
- （2）製品の加工領域を最適な加工方向ごとに分割する技術。
- （3）設計ミスに起因する金型上の加工困難形状の自動抽出とその改善技術。
- （4）5軸加工に関する特徴抽出に欠かせない幾何シミュレーション技術。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2007年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	12,100,000	3,630,000	15,730,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学，加工学

キーワード：CAD，CAM，幾何モデリング，フィーチャ抽出

1. 研究開始当初の背景

プラスチックやダイキャスト部品、板金部品の生産に用いられる金型は、製造の要（かなめ）ともいべき特殊なツールである。今日の製造業は、市場の動向をいち早くつかみ、それに対応できる製品を迅速に

市場へ投入することを重視している。そのためには製造準備期間の短縮が不可欠であり、金型をできるだけ短時間に用意できることが、大きな意味を持ち始めている。金型は、部品ごとに新規に製作される。金型製作のほとんど時間は、実加工の前のソフ

トウェア処理，具体的には，金型の形状モデルの作成，工程設計，NC生成，加工シミュレーションなどに費やされている．そこでわれわれは，金型製作で用いられるソフトウェアの高速化を目的に，各大学で研究を進めてきた．その結果，NC生成や加工シミュレーションに要する時間を大幅に短縮する技術の開発に成功し，その一部は既に自動車メーカー等で実用に供されている．

2. 研究の目的

製造の現場では，さらなる効率化を実現するために，NC生成の前段階にあたる工程設計の高速化が，強く望まれるようになってきた．金型製作における工程設計とは，前加工において削り残る部分の検出や，最適な工具の選択や加工姿勢の決定，そして加工手順を決める作業などを指す．自動車のインパネなどの複雑かつ巨大な成型品の金型では，工程設計に丸1日を要する場合もあり，大きな障害となっている．工程設計を支援するソフトウェアも市販されているが，工程設計には定型的な作業が少なく，企業や工場ごとに手順や方針が異なるため，市販ソフトウェアをそのまま利用できる事例はあまりない．工程設計には高度な技能が要求されるが，各メーカーは技能を企業の力の源泉として秘匿する傾向が強いので，これらが市販ソフトウェアに組み込まれることは期待できない．このような理由から，現状では経験豊富な技術者が，図面に基づいて加工の状態を想定しつつ，手作業で工程計画を作成することが一般的である．

工程設計のほとんどの作業は，

ステップ1：製品や工作物の形状から，ある幾何的な特徴を持つ部分形状を抽出し分類する．

ステップ2：分類結果に基づいて，各部分形状を加工するのに最適な方法と条件を決定

する．

の二つのステップからなる．例えば金型加工では，仕上げ加工中に工具が破損する事故を防止するために，削り残りが多い部分に事前に中仕上げと呼ばれる加工を施し，削り残りの深さを一定量以下にしておく．中仕上げ加工の工程設計では，最初に加工が必要な領域を工作物形状と製品形状を比較することで抽出し，得られた形状を深さや広さ，工具の接近可能性などの観点から分類する（ステップ1）．次に分類された各部分形状に対して，最適な工具の選択や加工条件の決定などを行う（ステップ2）．

自動車メーカーを中心に，企業での工程設計の実態を調査したところ，ステップ2の処理については，その判断基準や決定ルールが企業ごとに大きく異なることが分かった．一方，判断の材料として用いられる特徴的な部分形状については，ほとんどの企業で同じものが参照されている．特に粗加工で削り残る領域や，ある姿勢の工具が接近可能な領域，シャンクやホルダーと干渉する工作物の範囲などの情報が，頻繁に用いられている．したがって，これらの性質を満たす部分形状を，金型や工作物などの形状モデルから高速に抽出し分類するプログラム群を開発すれば，多くの企業で共通利用可能と考えられる．各メーカーは，特徴的な形状ごとに適切な加工法などを整理した独自のデータベースを構築しているので，抽出プログラムとデータベースを組み合わせることで，各メーカー向けの工程設計支援システムが容易に実現できる．

3. 研究の方法

本研究では，ステップ1の作業の自動化・効率化を目的に，複雑な曲面を有する金型や工作物の形状モデルから，工程設計において有用な特徴的な形状を，高速に抽出し分類す

るアルゴリズムの開発を行った。この問題は「フィーチャ抽出」と呼ばれ、通常の機械加工の分野では既に多くの技術が開発されている。しかし既存技術は、以下に示す理由から金型製作の工程設計ではほとんど機能しない。

(1) 複雑な形状：既存のフィーチャ抽出技術は、平面や円筒面、球面などからなるシンプルな機械部品を想定してアルゴリズムが開発されてきた。一方、金型は、その形状のほとんどが自由曲面から構成されており、これらのアルゴリズムが適用できない。

(2) 多様なモデル：金型加工の工程設計では、金型の形状モデルだけではなく、加工途中の工作物のモデルや工具モデルなど様々なモデルが利用される。これらのモデルの表現形式には、自由曲面はもちろん、それを離散化した多面体、点群、デクセル、ボクセルなど多様な形式が混在している。

(3) 特殊な変換：工程設計に有用な情報を得るために、モデルに特殊な変換を施すことも多い。例えば工具選択の際には、工作物形状にミンコウスキ変換を施す必要がある。工具の接近可能性を判定する際には、ガウスマップの利用が有効である。フィーチャ抽出技術は、このような変換後のモデルにも適用可能な必要がある。

(4) 形状変化：工程設計では、加工に応じて進行する工作物の形状変化を、積極的に扱う必要がある。例えば加工条件を決定する際には、工具移動に伴って変形していく工作物の「差分」を特徴的な形状として抽出する必要がある。

本研究では、3人の研究者が分担で、上記の問題に対応できる、新しいフィーチャ抽出アルゴリズムを研究・開発する。具体的には、以下のようにテーマを分担し作業を進めた。

乾（研究代表者）：自由曲面形状やそれを

離散化した点群やデクセル、ボクセルモデルからのフィーチャ抽出、ミンコウスキ変換された形状やガウスマップからのフィーチャ抽出。

森重：工作物形状の変化をフィーチャとして認識し抽出する技術の開発と、得られたフィーチャに基づく加工条件の決定法。

金子：数百万ポリゴンで表現された複雑形状からの効率的なフィーチャ抽出と、ミンコウスキ変換によって得られるコンフィギュレーション空間からのフィーチャ抽出。

4. 研究成果

研究の結果、フィーチャ抽出に関する以下の4つの技術の実現に成功した。

(1) 3方向デクセルに基づく立体形状の表現

複雑な3次元形状を微小かつ膨大な数のポリゴンや立方体を用いて近似的に表現する離散的な立体モデリング手法が普及し始めている。特に3方向デクセルは、ボクセル等の既存手法と比較して、形状をより高精度かつコンパクトに表現できるため注目されている。3方向デクセルは、加工シミュレーションなどで利用しやすくGPUを用いた高速処理にも向いている。本研究では、この3方向デクセルをフィーチャ抽出で利用することを考え、その準備としてCADシステムで多用されているポリゴンモデルと3方向デクセルの相互データ変換技術を実現した。本技術はGPUによる深度剥離を利用しており、300万ポリゴンからなる精密なモデルを数秒で3方向デクセル形式に変換できる。図1には複雑な金型モデルを本技術で $1024 \times 1024 \times 1024$ の解像度の3方向デクセルに変換した結果を示した。

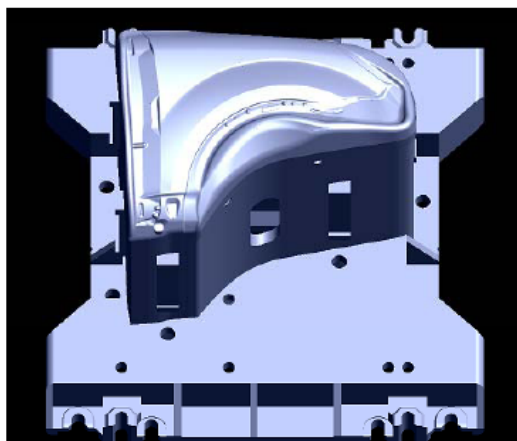


図1 ポリゴンモデルを3方向デクセルへ変換した結果.

(2) 製品の加工領域の最適な加工方向ごとの分割

自動車のバンパーなどの製造に用いられる金型には、深い形状を有する物が多い。上方から工具が接近する通常の加工法では、ホルダーと金型の干渉を避けるために工具の突き出し量を大きくする必要があり、工具の撓みによる精度低下が避けられない。このような金型を適切に加工するため、工具にユニバーサルアタッチメントを取り付け、工具の主軸を傾けて加工する固定5軸加工が広く行われている。固定5軸加工では、加工方向の選択を誤ると工具やホルダーと金型が衝突する問題が発生しやすい。そのため固定5軸加工の工程設計では、適切な加工方向の決定に多大な労力を費やしている。この問題を解決するために、一つの加工方向だけでは加工が困難な領域を、一方向から連続的に加工可能な幾つかの部分領域へ自動分割するアルゴリズムを開発した。本研究では、加工領域を点の集合により表現する。各点を微小な加工領域と見なせば、一つの自明な分割が既に得られていることになる。近接した2点では、加工可能な方向の傾向が似ていることが多い。そこで、類似な加工可能方向の分布を持つ点を、類似画像の検索で用いられるクラスタ分析により幾つ

かのグループにまとめ上げていくことで加工領域の自動分割を実現した。図2には、深い溝の隅に生じた加工領域を点の集合で表現し(図(a))、各点に対して工具の接近可能な加工方向を割当て(図(b))、さらにクラスタ分析により点をグループ分けし、加工領域を4つの部分に分割した結果を示した(図(c))。

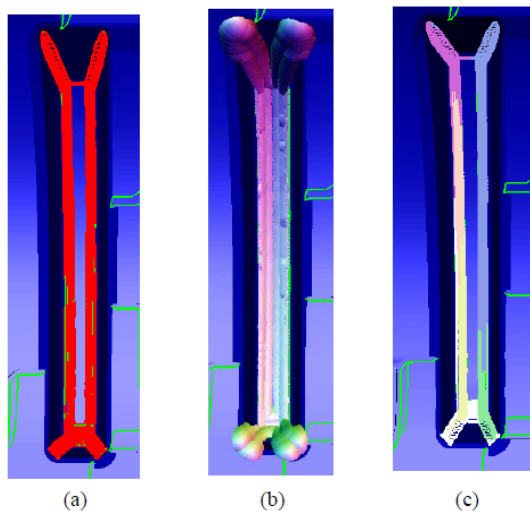


図2 複雑な加工領域を最適な加工方向に応じて自動分割した結果.

(3) 設計ミスに起因する金型上の加工困難形状の自動抽出とその改善技術

スムーズな金型製造を阻害する要因の一つに、設計不良に基づく加工上の不具合と手戻りの問題がある。加工不具合で最も多いのは、ホルダーなどの干渉により工具が接近できず切削できない形状である。このような不具合が作業設計やCAMで検出された場合には、大きな手戻りになってしまう、設計修正や再設計に多大な時間を要することになる。この種の不具合は頻繁に発生しており、一つの金型に数十の不具合が見つかることも珍しくない。手戻りを避けるために「現場でなんとかしてしまう」ことも多いが、その対応に大きな時間を要することは同じなので問題の解決になっていない。本研究では、この種の不具合を、金型モデルに対してミンコウスキ変換を繰り返して適用することで検出する手法を開発した。さら

に検出された不具合に対して、金型形状のどの部分をどの程度修正すれば不具合を解消できるかをビジュアルに表示する技術も開発した。図3には、金型構造部の座面に本手法を適用し、加工困難形状を検出した結果を示した。また図4には、図(a)中に緑色で示した加工困難形状を解消するには、どのような修正を施せばよい自動決定した結果を示した。図(b)中の赤色の部分が加工を阻害しているため、その部分に修正を施せば加工困難を解消することができる。

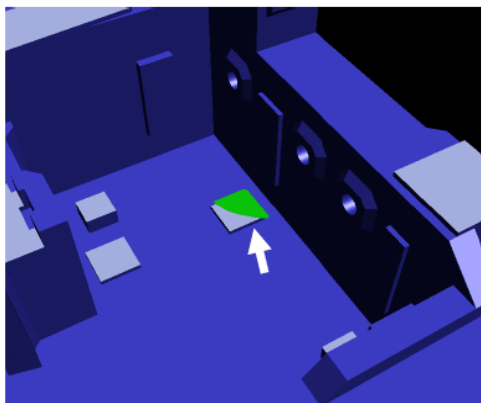


図3 自動検出された加工困難形状の一例。

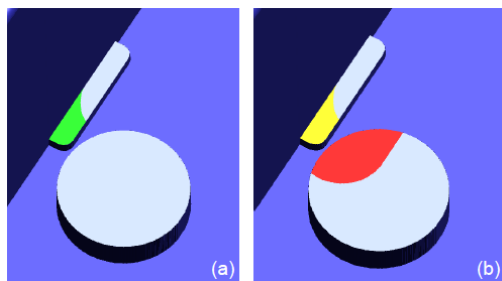


図4 加工困難解消(a)のための修正範囲の自動決定結果(b)。

(4) 5軸加工の幾何シミュレーション技術

今後、金型の切削加工では同時5軸制御の工作機械が普及すると予想される。同時5軸加工の工程設計を自動化するためには、幾何シミュレーション技術が不可欠だが、現状ではシミュレーション速度と精度の両面に問題がある。本研究では、3方向デクセルとGPUによる高並列処理を組み合わせることで、従来技術と比較して10倍程度高速なシミュレーション技術を実現した。本技術

では同時5軸加工のシミュレーションにおいて主要な役割を果たす、1) 移動する工具の掃引立体の生成、2) 工作物形状から工具掃引立体を差し引いた形状の生成、3) 加工結果の効率的な画面表示、の3つの処理をGPUで行う。図5には本シミュレータによる同時5軸加工の処理結果を、また表1には市販されているシミュレータとの処理時間の比較を示す。例題によっては10倍を超える高速化が達成されていることが分かる。

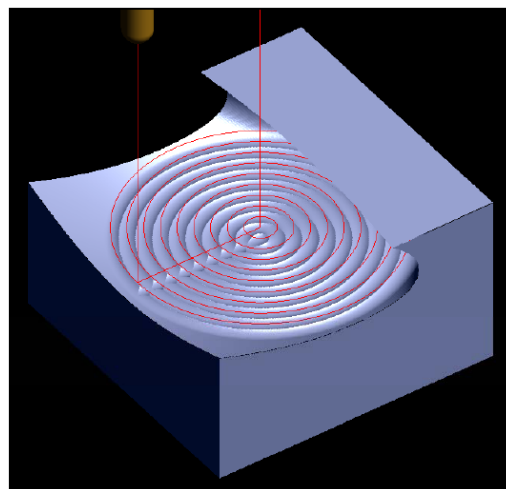


図5 幾何シミュレーションの一例。

	NC 命令数	工具径 (mm)	市販シミュレータ の処理時間 (sec)	本シミュレータの 処理時間 (sec)
1	1374	6.00	14.00	3.22
2	2561	2.75	38.00	9.11
3	4790	1.80	88.00	7.36
4	44889	2.75	998.00	70.78
5	60489	5.50	1289.00	192.25
6	244307	1.80	4761.00	367.58

表1 市販のシミュレータとの処理時間の比較。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① 乾正知, 大友祐二, 金型設計における機械加工検証システムの開発 (第一報—鋳物形状誤差を考慮した加工困難形状の検出—, 精密工学会誌, 第75巻, pp. 424-429, 2009, 査読有)
- ② 藤野裕典, 森重功一, 機械の可動範囲と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報, 精密工学会誌, 第 74 卷, pp. 1330-1334, 2008, 査読有.
- ③ 金子順一, 堀尾健一郎, グラフィックスハードウェアを用いた形状評価における正確な曲面と視線との交差座標の導出法—モデリング空間における視線交差位置の推定を利用した多面体近似時の誤差補正—, 精密工学会誌, 第 74 卷, pp. 480-485, 2008, 査読有.
 - ④ 森本國文, 乾正知, 金型加工の工程設計支援技術に関する研究 (第三報) —傾斜加工のための加工領域の自動分割アルゴリズム—, 精密工学会誌, 第 74 卷, pp. 193-197, 2008, 査読有.
 - ⑤ 平野千尋, 森重功一, 5 軸制御加工機を利用した突き荒加工法の開発, 精密工学会誌, 第 73 卷, pp. 1261-1266, 2007, 査読有.
 - ⑥ 森本國文, 乾正知, 金型加工の工程設計支援技術に関する研究 (第二報) —安定した金型加工のための最適な工具姿勢の決定アルゴリズム—, 精密工学会誌, 第 73 卷, pp. 286-290, 2007, 査読有, 精密工学会研究奨励賞受賞.
 - ⑦ M. Inui and A. Ohta, Using a GPU to Accelerate Die and Mold Fabrication, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 27, pp. 82-88, 2007, 査読有.
 - ⑧ 乾正知, 金型加工の工程設計支援技術に関する研究 (第一報) —削り残り領域の逆オフセット面への投影アルゴリズム—, 精密工学会誌, 第 72 卷, pp. 244-248, 2006, 査読有.

[学会発表] (計 5 件) (国際会議のみ)

- ① W. Huang and M. Inui, An Algorithm for Determining the Optimal Cutter Length in 3-Axis Milling, Proc. 2009 IEEE International Conference of Mechatronics and Automation (ICMA2009), to appear, 2009, 査読有.
- ② J. Kaneko, K. Teramoto, K. Horio, and Y. Takeuchi, Fast Estimation Method of Workpiece Shape in NC Machining Process for Prediction of Instantaneous Cutting Force, Proc. of the 7th International Conference on Machine Automation (ICMA2008), pp. 357-362, 2008, 査読有.
- ③ M. Inui and K. Morimoto, Automatic Subdivision of Milling Region for 3-Axis Milling Machine with Inclined Cutters, Proc. 2008 International Symposium on Flexible Automation (2008 ISFA), CD-ROM 版, 2008, 査読有.
- ④ K. Morimoto and M. Inui, A GPU based

Algorithm for Determining the Optimal Cutting Direction in Deep Mold Machining, Proc. IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM 2007)}, CD-ROM 版, 2007, 査読有.

- ⑤ M. Inui and R. Ishizuka, Data Compression Method of Z-Map Model Representing Milling Result Shape, Proc. 2006 International Symposium on Flexible Automation (2006 ISFA), pp. 343-348, 2006, 査読有.

[その他]

- ① 乾正知, SmartCAM の 5 軸加工支援機能について, 特集「3 次元 CAD/CAM と図面作成」ツールエンジニアリング誌掲載, 2008 年 9 月号, 大河出版, 2008.
- ② 藤末晃, 大塚宏明, 小瀧和志, 乾正知, プラスチックバンパーの金型加工における工具姿勢の最適工程設計, 型技術誌掲載, 2007 年 12 月号, 日刊工業新聞社, pp. 26-27, 2007.
- ③ 毎田和博, 乾正知, 石丸真, 金型設計における機械加工検証支援システムの開発, 型技術誌掲載, 2007 年 12 月号, 日刊工業新聞社, pp. 10-11, 2007.
- ④ 乾正知, 茨城大学工学部乾研究室開発ハードウェア CAM, 型技術誌掲載, 2007 年 10 月号, 日刊工業新聞社, pp. 30-33, 2007.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

乾 正知 (MASATOMO INUI)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号: 90203215

(2) 研究分担者

森重 功一 (KOICHI MORISHIGE)

電気通信大学・電気通信学部・准教授

研究者番号: 90303015

金子 順一 (JUN'ICHI KANEKO)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号: 80375584

(3) 連携研究者

なし