

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360058

研究課題名（和文） CG画像簡略化技術を用いた発泡スチロールの自由曲面加工・計測システムの構築

研究課題名（英文） Construction of Combined System of Machining and Measuring processes for Free-Form Surface of Polystyrene Foam using simplification procedure in CG Technology.

研究代表者

齋藤 義夫 (SAITO YOSHIO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00108218

研究成果の概要（和文）：

複雑な三次元自由曲面形状の利用が増え、早い段階で設計情報と実際に加工された形状の確認が必要になっている。ところが、三次元の自由曲面形状はデータ量が多く、測定に時間がかかり、実際の形状と目標形状の相違を把握することも難しいことから、加工と計測の融合が必要不可欠となってくる。そこで、CG分野で利用されている画像簡略化手法を適用し、加工と計測を結合した発泡スチロール用加工システムの構築を試み、形状創成に関する新たな知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：

Increasing a usage of 3D free-form surface, it is necessary to confirm an accuracy of machined surface compared with designed one. However, it is difficult to investigate a difference between them due to huge of data for free-form surface and time consuming of measurement. Therefore, machining and measuring processes must be combined to produce a free-form surface. Applying simplification procedure in CG field, new machining system with measuring process for free-form surface of polystyrene foam was proposed and significant information was obtained as a result.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2011年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			0
年度			0
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

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：生産システム、自由曲面加工、三次元形状計測、画像簡略化、多軸制御

1. 研究開始当初の背景

設計、製造工程では、三次元形状を扱えるCAD、CAM、CGシステムの普及が進み、早い段階での3Dラピッドプロトタイピングの

重要性が増加している。3Dラピッドプロトタイピングの役割は、設計段階での三次元形状データが設計者のイメージと対応しているか、実形状としての見栄え、感触など、感性的な評価と一致しているか、を実際に確かめる

ことである。これらの観点から、光造形法や積層付加工法などの新しい三次元形状創成法が最近脚光を浴びている。

ところが、自由曲面形状はデータ量が多く、近似状態で実際の形状は微妙に異なることから、加工と計測が融合したシステムが必要不可欠となってくる。自由曲面の正確な情報は加工物に反映されなければならないので、加工した結果と計測結果が一对で対応することで始めて精度が確保されることになる。例えば、意匠設計や建築分野で広く利用されている発泡スチロールはナイフや熱線ワイヤで容易に加工できることから、自由曲面の製作に適しているが、作成作業は人間の熟練に頼っているのが現状であり、加工と計測を熟練者が行っている。

このような背景を考慮して、発泡スチロールの特徴を生かし、多軸制御による熱線加工を用いた3Dデジタルプロトタイプング機の試作研究を平成15年度から既の実施している。熱線形状が自由に成形できることと、加工機の運動自由度とあわせることで、理想的なラピッドプロトタイプング法の実現が可能であることを示し、多軸制御に適した加工経路パスの生成方法を提案するなどの成果を挙げており、さらにこれらの成果を発展させ、CG画像簡略化技術を用いた発泡スチロールの自由曲面加工・計測システムの構築を試みることにした。

2. 研究の目的

前述のような研究背景に基づき、本研究では、CG分野で開発されたプログレッシブ・メッシュなどの考え方を多軸制御工作機械の加工パス生成に利用することにより、彫像などの自由曲面の製作を効率よく行えるシステムを構築することを目的としている。特に、加工と計測を同じ機械上でを行い、これまで明確な定義もないまま議論されていた、自由曲面の加工精度について、新しいCG分野との結合という観点から実用的な評価方法を提案することを目標とした。

具体的には、曲面を美しく表現できる芸術家は、自由曲面を始めは平面の集まりとして把握し、概略的な表現を行っている。平面近似モデルはデッサン練習用の石膏モデルであり、曲面で表された対象を練習段階では平面近似で三次元形状を捉える訓練に利用されている。実モデルの特徴を損なわないように、少ない平面で立体を表現するための訓練であり、複雑な三次元形状を少ない情報量で的確に表している。

一方、コンピュータグラフィックス(CG)

の分野では、データ量の多い自由曲面をデータ量の少ないポリゴンに簡略化して高速処理に対応できる動画表現手法に関する研究が盛んである。画像情報の簡略化あるいは単純化に関する技術は、情報量を少なくしても元の画像情報の特徴を失わないようにするための処理であり、画像情報処理技術としてめまぐるしい勢いで進歩を遂げている。

このCG画像簡略化技術と前述の芸術家が訓練で行っている平面近似法は、工程が逆であるが、いずれも画像情報を簡略化する技術という意味で共通しており、この技術を自由曲面の機械加工に応用することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

自由曲面の製作においては、加工と計測を融合したシステムが必要不可欠であることから、CGにおける画像簡略化手法を適用し、加工性の良い発泡スチロールを対象とした、自由曲面加工・計測システムを構築することを研究目的として、下記の項目について研究を実施した。

- (1) 発泡スチロールの加工特性に適したパスの生成と計測プロセスとの融合
- (2) CG画像簡略化技術を応用した粗加工プロセスの開発とその精度向上
- (3) 8軸制御熱線加工機の高速制御化とレーザ計測装置の組込みによるシステムの改善
- (4) 加工と計測を統合した3次元自由曲面生成システムの構築
- (5) 発泡スチロールに適した粗加工・仕上げ加工用CAMシステムの構築
- (6) CG画像簡略化技術の高効率演算法の開発と加工・計測パス生成への展開

4. 研究成果

3年間の研究で得られた研究成果について以下にまとめる。

- (1) 8軸制御熱線加工機による自由曲面加工・計測システムの構築に関して：(5. 主な発表論文等の雑誌論文③)の成果を参照)

図1に示すように、6軸の汎用多関節マニピュレータを中核として、回転2軸のテーブルを組み合わせた8軸の熱線加工機を製作し、これを用いて発泡スチロールの自由曲面加工および計測に関する研究を実施した。図1ではエンドエフェクターに熱線工具を装着した状態を示しており、発泡スチロールの粗加工を行う場合である。エンドエフェクターとして、各種の仕上げ用熱線工具、計測用レーザ変位計などが取り付けられるように設計されている。

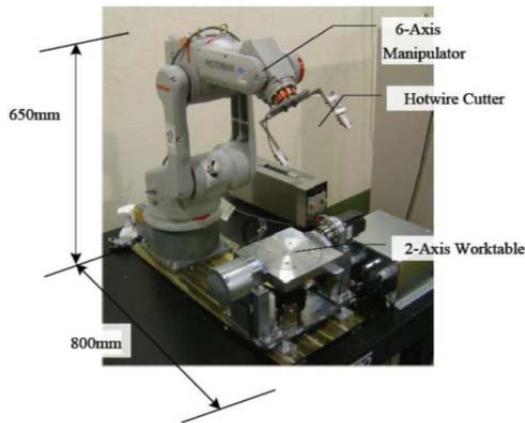


図1. 8軸制御熱線加工機の外観

8軸制御熱線加工機の制御においては、図2に示すように、計算機内でシミュレーションができる環境を構築して、バーチャルマニファクチャリング技術に関して研究を実施している。加工したい3次元形状を入力するとそれに適した工具パスとロボットの制御パスを計算機上で確認できるシステムである。

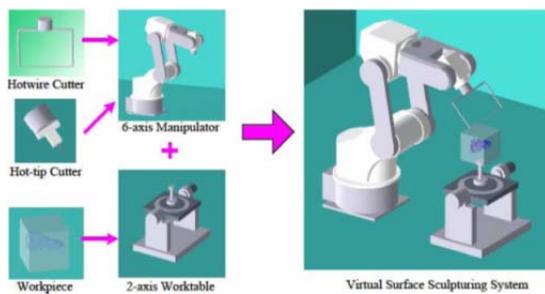


図2. バーチャルマニファクチャリング



図3. 発泡スチロールの加工状況のシミュレーション

(2) 発泡スチロールの加工特性に適したパスの生成と計測プロセスとの融合に関して：(雑誌論文④参照)

発泡スチロールの加工メカニズムは熱溶解、熱分解現象であり、基本的にはまったく機械的な加工力がかからない状態である。しかし、機械としての振動は工具である熱線に影響するので、発泡スチロールの加工特性に適した加工パスの生成を自動化するとともに、加工された面の計測を行うプロセスを融合する。自由曲面加工用に8軸制御としているが、こ

の8軸機械の動剛性、振動特性を考慮する必要があり、加工と計測に及ぼす強度や剛性について実験的・理論的研究を行い、これらを超高速で制御するための多自由度の空間移動について制御方法を検討し、多くの知見を得た。さらに、それらの結果をシミュレーションにより図3に示すように、確認することもある程度可能にすることができた。

(3) CG画像簡略化技術を応用した粗加工プロセスの開発とその精度向上に関して：

自由曲面の情報については、意匠設計として濃淡や陰影を付けたスケッチ図が利用され、具体的な数値データがない場合が多く、スケッチ図をもとに試作し、三次元形状データを作り上げている。このように、自由曲面に関してはどの段階の形状情報が正しいか議論することが難しい。図4は多数のポリゴンで表現したモデルをCG画像簡略化技術を応用し、加工工程に適した単純化を行った例である。芸術家が少ない平面で近似する過程を実現したもので、芸術家の創作過程と反対に、画像簡略化技術を機械加工の粗加工、仕上げ加工に対比させ、自由曲面の加工に適したパス生成について研究を行い、その精度について検討を加えた。この研究成果は発泡スチロールの加工だけにとどまらず、多軸加工においても有効であることを実証した。

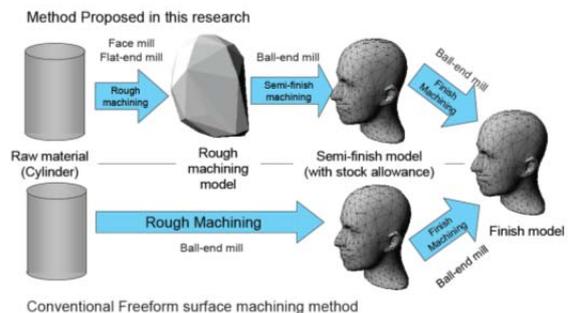


図4. 自由曲面の加工プロセスと精度の関係

(4) 加工と計測を統合した3次元自由曲面生成システムの構築に関して：(雑誌論文③、④参照)

最近実用化が盛んになっている機上計測技術とも関連して、三次元形状測定技術の実用化とも結びつき、加工と計測をインタラクティブに行う3次元自由曲面創成システムの構築を試みた。具体的には、製品モデルを簡略化することで、粗加工用のモデルを生成し、この簡略化とは逆に粗加工から仕上げ加工を行うことで、加工パスを合理的に生成することが可能となる。これらの過程で加工と計測を組合せることにより、多軸制御加工の特性把握と制御精度の向上が図れる。例えば、加工においては、加工機の動きと熱線の向きを考えることで容易にパスの生成方法が理解で

きるが、逆に曲面の情報から加工に必要な熱線の移動パスを探し出すことは非常に難しい。ロボットの逆運動学以上に冗長度が高いことが予想できる。そこで、加工と計測が融合することにより、多軸制御に適合できる逆変換プロセスの開発を行なった。

(5) 発泡スチロールに適した粗加工・仕上げ加工用CAMシステムの構築に関して：(雑誌論文③、④、⑤参照)

CG画像簡略化技術により平面近似による粗加工プロセスと最終的な仕上げ加工の組み合わせについて、加工特性を考慮して最適な加工条件を選定できるCAMシステムを構築した。粗加工時は粗計測、仕上げ加工時は精密計測をそれぞれ対応させることにより、システムの効率向上を図る。さらに、従来あまり明確な議論がされていない、曲面の精度について、加工と計測を融合することによるリバースエンジニアリングへの適用も含めて、評価手法の開発を試みた。

(6) CG画像簡略化技術の高効率演算法の開発と加工・計測パス生成への展開に関して：

CG画像簡略化技術としてはプログレシブ・メッシュの考え方などを基本に、本システムに調和するように数値演算速度の向上を図り、加工・計測パスの曲線補間精度と制御速度の最適化を実施した。ここでは、曲面上の測定点からポリゴン情報に変換するソフトウェアは既に種々のものが開発されているので、それらを有効に利用するとともに、本方式の特徴を生かした面張り手法を提案した。

以上の各研究成果を融合することで、例えば、図5に示すように、対象物の特徴を抽出することの必要性を明らかにするとともに、加工と三次元計測の融合がもたらす利点を生かせる研究分野の開拓にも成果を挙げることができた。(雑誌論文①、②、⑤参照)

また、三次元形状の計測評価の観点でも多くの成果を得ることができたことから、多様な三次元モデルから実試作モデルを超高速で作成する、コンカレントエンジニアリング、リバースエンジニアリング、インバースエンジニアリングと関連した新しい分野の実用化に貢献できる成果といえる。さらに、最近米国で着目されているパーソナル・ファブ리케이션にも寄与できる成果と確信している。

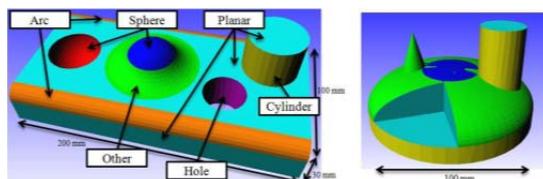


図5. 三次元形状の特徴抽出

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5件)

① Xiaoyi Wang, Jing Chen, Jiang Zhu, Yoshio Saito, Tomohisa Tanaka. Registration of 3-D Shape with Free-form Surface Using Imageware and Genetic Algorithm, Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, 査読有, Vol. 472-475, pp. 317-322, Feb. 2012.

<http://www.scientific.net/AMR.472-475.317.pdf>

② Jiang Zhu, Yuichi Takekuma, Tomohisa Tanaka, Yoshio Saito. 3D Model Registration Based on Feature Extraction, Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, Switzerland, 査読有, Vol. 299-300, pp. 1091-1094, Jul. 2011.

<http://www.scientific.net/AMR.299-300.1091.pdf>

③ Jiang Zhu, Tomohisa Tanaka, Yoshio Saito, Lining Sun. Study on virtual environment-based simulation, control and teleoperation in the application of robotic machining and manipulation, International Journal of Design Engineering, Interscience Enterprises Ltd., 査読有, Vol. 3, No. 3, pp. 218-231, Apr. 2011.

<http://www.inderscience.com/IJDE030301>

④ JIANG ZHU, Keisuke Nomura, TOMOHISA TANAKA, YOSHIO SAITO. Tool Path Planning Assist System for Freeform Surface Machining, Key Engineering Materials, Trans Tech Publications, 査読有, Vol. 447-448, pp. 321-325, Jul. 2010.

<http://www.scientific.net/KEM.447-448.321>

⑤ Yuusuke Narabu, JIANG ZHU, TOMOHISA TANAKA, YOSHIO SAITO. Automatic Manufacturing Feature Extraction of CAD Models for Machining, Key Engineering Materials, Trans Tech Publications, 査読有, Vol. 447-448, pp. 287-291, Jul. 2010.

<http://www.scientific.net/KEM.447-448.287>

[学会発表] (計12件)

① Jiang Zhu, Tomohisa Tanaka, Yoshio Saito. Tool Path Generation for 3D Freeform Surface Machining Based on the Feature of

CAD Model, The 2nd IFToMM Asian Conference on Mechanism and Machine Science, 査読有, Nov. 8. 2012. Japan(Tokyo)

② 関口 翔太, 朱 疆, 田中 智久, 齋藤 義夫. 8 軸冗長ロボットシステムを用いた加工システムの構築, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 精密工学会, pp. 675-676, Mar. 16. 2012. (東京)

③ 長谷川将臣, 朱 疆, 田中智久, 齋藤義夫. 多分解能メッシュによるターニングセンタの粗加工工程の検証, 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2012 講演論文集, 日本機械学会, No. 12-7, pp. 29-30, Mar. 13. 2012. (東京)

④ Jiang Zhu, Yusuke Narabu, Tomohisa Tanaka, Yoshio Saito. Manufacturing Feature Extraction System of 3D-Model for Process Planning, Proceeding of The 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), The Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), 査読有, Nov. 8. 2011. Japan (Saitama)

⑤ 関口 翔太, 朱 疆, 田中 智久, 齋藤 義夫. 8 軸冗長ロボットシステムによる三次元加工, 日本機械学会 2011 年度年次大会 講演論文集, 日本機械学会, No. 11-1, Sep. 14. 2011. (東京)

⑥ 武藤沙織, 朱 疆, 田中 智久, 齋藤 義夫. RP 装置による三次元形状の創成と評価, 日本機械学会 2011 年度年次大会 講演論文集, 日本機械学会, No. 11-1, Sep. 14. 2011. (東京)

⑦ Asim Al-Sofi, Yoshio Saito, Tomohisa Tanaka, Jiang Zhu. Generating the Measurement Points Based on Finishing NC Data, Proceeding of 2011 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 査読有, pp. 34-38, Apr. 13. 2011. Turkey (Istanbul)

⑧ 武隈裕一, 朱 疆, 田中智久, 齋藤義夫. 三次元モデルの比較による形状評価システムの構築, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 精密工学会, pp. 665-666, Mar. 14. 2011. (東京)

⑨ 奈良部優介, 朱 疆, 田中智久, 齋藤義夫. 三次元形状モデルからの加工法自動決定システムの開発, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 精密工学会, pp. 577-578, Mar. 14. 2011. (東京)

⑩ Jiang Zhu, Keisuke Nomura, Tomohisa Tanaka, Yoshio Saito. Rough Machining Tool Path Generation for Multi-axis Turning Center Based on Multi-resolution Mesh, Proceeding of the 14th International Conference on Mechatronics Technology, 査読有, pp. 12-16, Nov. 24. 2010. Japan (Oosaka)

⑪ 西山浩司, 朱 疆, 田中智久, 齋藤義夫. 2.5 軸輪郭加工に適した高効率加工パスの生成, 2010 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 精密工学会, pp. 403-404, Sep. 29. 2010. (東京)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 義夫 (SAITO YOSHIO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：00108218

(2) 研究分担者

田中 智久 (TANAKA TOMOHISA)

東京工業大学・理工学研究科・准教授
研究者番号：70334513

朱 疆 (ZHU JIANG)

東京工業大学・理工学研究科・助教
研究者番号：70509330

(3) 連携研究者

なし