

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 22 日現在

機関番号：35504

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420232

研究課題名(和文) 産業用ロボットの新しい用途開発に関する研究 発泡プラスチック加工ロボット

研究課題名(英文) Development of a New Application Using an Industrial Robot -Foamed Polystyrene Machining Robot-

研究代表者

永田 寅臣 (Fusaomi, Nagata)

山口東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：50435070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：アルミダイカスト製品、機械部品など様々な砂型鋳物が作られている。砂型は大きな鋳物の成形が可能である、型作成コストが金型に比べ安価である、短時間の準備期間で作成することができる、などの理由から非常に重要な材料加工法として成長してきた。砂型のもとになる型は発泡スチロール材を加工した樹脂型から製作され、その製造工程はアルミダイカスト製品を生産する上で非常に重要である。本研究では、CNC工作機械の約1/10の低コストで実現できる加工自由度の高い「発泡スチロール型のための3次元加工ロボット」を開発し、発泡スチロール材の加工時特有の問題点である毛れ(むしれ)や欠けを抑えた自動加工技術を確立する。

研究成果の概要(英文)：A cast metal is generally produced using a sand mold. A foamed polystyrene mold is used as the master mold for making the corresponding sand mold. Recently, the development of a flexible machining robot for foamed polystyrene materials is expected in cast metal industries because of high cost and inefficiency of conventional large-sized CNC machine tools. We presented a machining robot to cope with the need. The developed robotic CAM provided an interface without using a robot language between a CAD/CAM system and the robot. Also, a trajectory following controller with micro vibrational motion was developed for a ball endmill to enhance the machining performance. Many machining experiments were conducted using the robot, so that it was confirmed that the quality of machined surface depended on machining conditions. The effects of spindle speed (RPM), feed rate (mm/s), pick feed (mm) and amplitude of vibration motion (mm) were evaluated to reduce the undesirable chipping and plucking.

研究分野：知能機械学・機械システム

キーワード：産業用ロボット 発泡プラスチック 切削加工 CAD/CAM 微小振動生成 STLデータ

1. 研究開始当初の背景

模型は、鋳物製品を作るための砂型の原型となる型のことであり、木型模型、発泡スチロール模型の何れかが用いられているが、最近では多品種小ロットに向いていること、木型より安価で軽量なことから、発泡スチロール模型が主流となっている。模型のなかで新規に製作される型の80~90%が発泡スチロール材であるとの報告があるが、これは木材よりも被加工性がよいこと、エンドミル(回転切削工具)の摩耗が少ないこと、使用済みあるいは製作途中で発生した不用な発泡スチロールが再生可能であることなどの理由による。

しかしながら、このような発泡スチロール材の加工工程に目を向けてみると、木質材料よりも材料剛性が低いにもかかわらず、高額で大型、高剛性のCNC工作機械によるエンドミル加工で行われており、オーバスペック、オーバークオリティといったコスト的に非常に非合理的な自動機械の使用を余儀なくされている。また、図1のようなスピンドルチルト型などの5軸ヘッドを有するCNC工作機械であっても、機構上、傾斜・旋回できる主軸部分のサイズが大きく、動作範囲が狭いことからオーバーハングを有するデザインの一括加工には不向きであり、複数工程による分割加工、加工境界面の手加工が必要となっており、非常に加工効率が悪いといった問題点があった。さらに、発泡スチロール材の加工時特有の問題点である「むしれ」や「欠け」を抑えたエンドミルによる加工法についてはほとんど報告例がなかった。



図1 スピンドルチルト型5軸工作機械

2. 研究の目的

アルミダイカスト製品、機械部品など様々な砂型鋳物が作られている。砂型は大きな鋳物の成形が可能である、型作成コストが金型に比べ安価である、短時間の準備期間で作成することができる、などの理由から非常に重要な材料加工法として成長してきた。砂型のもとになる型は発泡スチロール材を加工した樹脂型から製作され、その製造工程はアルミダイカスト製品を生産する上で非常に重要である。本研究では、CNC工作機械の約1/10の低コストで実現できる加工自由度の高い「発泡スチロール型のための3次元加工ロボット」を開発し、発泡スチロール材の加工時

特有の問題点である「むしれ」や「欠け」を抑えた自動加工技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

3年間を通して以下の研究ステップを経て研究目的の達成を図った。

3.1 平成25年度

ハイコストなCNC工作機械を用いた加工システムの研究が行われているが、平成25年度は従来の木工用スピンドルチルト式5軸CNC工作機械の約1/10の価格で導入できる6自由度垂直多関節型の小型産業用ロボットをベースにして、図2のような加工ロボット本体を試作開発した。具体的には、回転数を0~60,000rpmの範囲で高精度に自動調整できる小型軽量の電動スピンドルをベースとした工具を試作開発し、軽量アタッチメントにより研究室の既存設備であるオープンアーキテクチャ型の教育用小型産業用ロボットRV1Aのアーム先端に装着できるようにし、実験用加工ロボットを構成した。工具先端部には、様々な形状とサイズのエンドミルを固定できる。その後、オーバーハングを持つ発泡スチロール型の加工時における、ワークとアーム、ワークとエンドミルの干渉問題について実験的に検証し、3次元CAD/CAMを用いたエンドミルのアプローチ方法、姿勢制御法、退避方法などのための軌道生成、すなわちカッターロケーションデータ(CLデータ)の生成方法について検討した。今回は予算上の都合により、研究室の既存設備である産業用ロボットを用いたが、6自由度を有するものの、教育用としての用途が主であるため第3軸の可動範囲が特に狭く、工具先端の姿勢を大きく変化させることができなかった。今後は、一般的な6自由度の産業用ロボットに適用し、評価を行うべきであろう。



図2 開発した加工ロボット

つぎに、産業界に広く普及し始めている3次元CAD/CAMとの連携を考慮したロボット制御インタフェース(ロボットCAMシステム)について検討した。ロボットCAMシステムは、オンラインやオフラインの教示を行うことなく、すなわちロボット言語を用いることなくロボットアーム先端に装着したエン

ドミルの位置(3自由度)と姿勢(3自由度)を直接制御できるようにするためのロボット制御インタフェースである。具体的には、汎用の3次元CAD/CAMのメインプロセッサが生成する基本工具経路(CLデータ)を目標軌道として直接参照でき、エンドミルの位置と姿勢をCLデータに沿って追従制御させる機能の設計とソフトウェア開発を行った。

3.2 平成26年度

前年度は、産業用ロボットのためのCAMシステムには従来のCAD/CAMのメインプロセッサがカットロケーション(CL)データを算出する機能に加えて、そのCLデータに基づく位置と姿勢の軌道追従制御の機能までを含むものと定義し、CLデータ及びNC(数値制御)データに対応した軌道追従制御系を設計した。その後、このCAMシステムを加工ロボットに適用し、加工実験を行った。平成26年度に行った加工実験ではエンドミルの形状とスピンドルの回転速度を固定した上で、発泡スチロールの材質、工具の送り速度、加工回数の条件を変えて加工を行い、これらの条件の加工品質への影響を検証した。また、エッジ部での加工欠けを抑え、表面の加工品質を改良し、さらに加工時間の増加を抑えるために新たに速度調整機能を追加した。この速度調整機能は、CLデータの位置情報を基に加工方向の変化を割り出し、その変化に応じて加工速度を調整する。半球形状のヘリカルパスに対する動作実験を行い、速度調整機能の効果を検証した。その結果、曲率の大きな部分、すなわち加工方向が大きく変化する場所において加工時間が微増するものの、ロボットの位置誤差の平均値を減少させることができた。

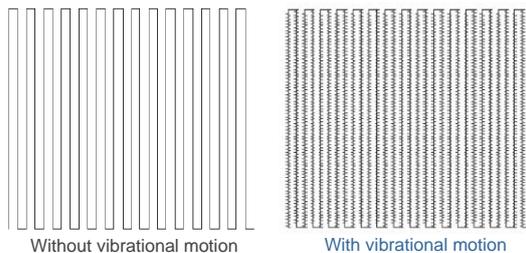


図3 ジグザグパスへの微小振動の生成

つぎに、図3のように工具の進行方向に直交するスティックスリップモーション(微小振動)を発生させることで、カスプマークの効率的な除去方法を提案した。これまでの工作機械による3次元加工ではボールエンドミルが使用されるが、除去加工に特有のカスプマークが発生していた。カスプマークの高さを抑えるためには、ピックフィードの幅を小さく設定してパスを生成すればよいが、CLデータのステップ数が増えるというトレードオフの問題があり、結果的に加工時間も大幅に伸びてしまうという問題があった。このため、CLデータに基づく微小振動ベクトルの

オンライン生成法を提案し、シミュレーションによる出力実験を行い、設計どおりに微小振動を発生できることを確認した。

3.3 平成27年度

平成26年度に提案した微小振動を用いた加工法を応用し、ボールエンドミルの微小振動制御が可能な加工ロボットとして実現し、発泡スチロール型の加工実験による最適加工条件の抽出を行った。発泡スチロール型の加工工程ではCNC工作機械による荒加工後に熟練作業者は仕上げ工具を前後左右に小刻みに動かしながら手作業で加工面を仕上げている。本研究ではエンドミルに微小振動を発生させ、振幅や周期を調整することで加工品質の向上を図った。エンドミルのサイズ(直径3mm程度)、刃形状と刃数(スパイラル刃のボールエンドミル)、エンドミルの送り速度(3cm/s以下)と回転速度(55,000rpm程度)、切り込み量(20mm以下)、エンドミルに与える振幅(ピックフィードに近い値)、エンドミルに与える微小振動の周期(振幅と同程度の発生頻度)を発泡スチロール型の最適な加工条件の指針値として示した。

図4には振動がない場合と振動を発生させた場合(振幅を0.5mm)の加工表面を示す。振動を加えることで縦縞模様のカスプの発生を抑えることができています。また、図5にはこのときの工具先端位置の制御結果の例を示す。

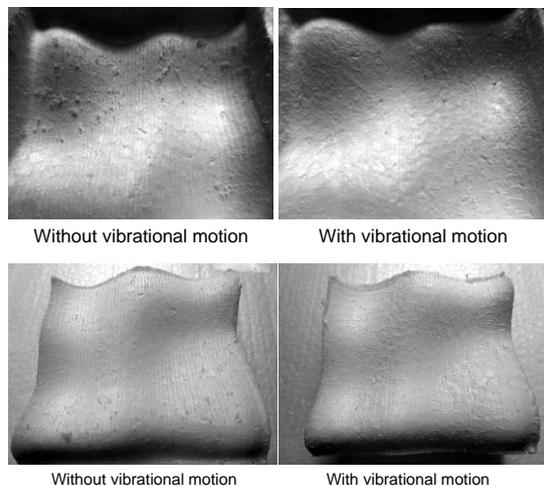


図4 微小振動による加工結果

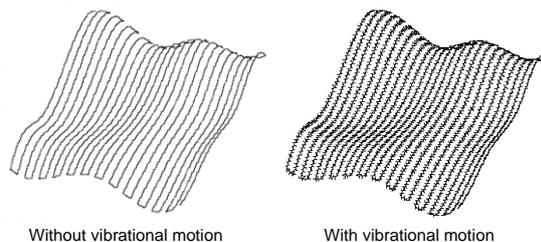


図5 工具先端位置の制御結果の例

つぎに、3Dプリンターへの出力形式であるSTLデータを用いてロボット加工できるよう

にインタフェイスを検討することで従来のCAM工程を省力化できるシステムの可能性を示した。加工実験から3Dプリンターと同等のユーザインタフェイスで加工ロボットを利用できることが示された。この場合、STLデータに含まれる多数の三角パッチから直接加工用パスを生成させると既加工領域がオーバカットされてしまうショートカットパスが含まれることになるため、オーバカットを回避するための加工パスの生成法についても検討した。

さらに、深度センサとして普及しているKinectを用いて3D点群を意味するポイントクラウドデータ(PCD)を撮影し、PCDをハンドリングできるPoint Cloud Libraryを用いて3Dプリンターで利用可能な三角パッチベースのSTLデータを生成させ、簡単なリバースエンジニアリングの実現方法を示した。これにより、人物顔などの実オブジェクトからSTLデータのようなデジタルデータを構成できるようになり、3Dプリンターによる積層加工に加えて、STLデータから工具経路であるCLデータを出力させることで加工ロボットによる除去加工も可能になった。

4. 研究成果

3年間を通じて以下の研究成果が得られた。

4.1 平成25年度

研究初年度は、研究室で所有していた教育用ロボットを用いて「発泡スチロール材料を加工するための基本ロボットシステム」を構築することができた。また、動作範囲と姿勢制御の点で小型教育用ロボットを用いた場合の問題点を抽出した。さらに、従来のロボット言語を用いることなく、設計加工支援のソフトウェア(CAD/CAM)で作成するCLデータで直接ロボットを制御するためのシステムを開発できた。

4.2 平成26年度

研究の中間年度は、ロボットアーム先端に回転切削工具を持たせて発泡材の加工実験を行い、CADで設計したモデルを良好に削り出すことができた。また、欠けやすい発泡材の加工不良を防ぐために送り速度の自動調整機能を開発し、その有効性を確認した。さらに、工具進行方向と直交する方向に微小な振動を発生させてカスプマークの発生を抑えることで、発泡材表面の加工品質を高める方法を示した。

4.3 平成27年度

最終年度は、まず、発泡スチロール型の加工実験を通して最適加工条件について検討し、指針値を示すことができた。切削工具に発生させる微小振動の振幅や周期を調整することで加工品質を向上させた。つぎに、最近話題となっている3Dプリンターが持つ優れたユーザインタフェイスを、加工ロボットでも実現するための方法について検討した。

さらに、深度センサで計測した実在のオブジェクトから工具経路(CLデータ)を生成させて発泡材に加工を施すことができるリバースエンジニアリングの方法を示し、人物顔の実加工により有効性を確認した。

4.4 平成28年度以降

研究協力先であるSOLICはCAD/CAMやマシンニングセンターを駆使した特殊3次元加工に取り組んでおり、平成28年6月にはFANUC製の大型産業ロボットの導入と加工ロボットとしての利用技術の研究開発が予定されている。このため、当該科学研究費助成により構築してきた加工ロボットのための機能を実装しながら、FANUC製ロボットへの移植性の評価と実用化のための研究を共同で進める予定である。

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6件)

[1]F. Nagata, S. Yoshitake, A. Otsuka, K. Watanabe, M.K. Habib, Development of CAM system based on industrial robotic servo controller without using robot language, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 29, No. 2, pp. 454-462, 2013.

DOI:10.1016/j.rcim.2012.09.015

[2]F. Nagata, A. Otsuka, K. Watanabe and M.K. Habib, Fuzzy Feed Rate Controller for a Machining Robot, Procs. of the 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 198-203, Aug. 2014.

DOI:10.1109/ICMA.2014.6885695

[3]F. Nagata, A. Otsuka, K. Watanabe and Maki K. Habib, Machining robot for foamed polystyrene materials using fuzzy feed rate controller, International Journal of Mechatronics and Automation, Inderscience Publishers, Vol. 5, No. 1, pp. 34-43, 2015.

DOI:http://dx.doi.org/10.1504/IJMA.2015.068452

[4]F. Nagata, M.K. Habib, A. Otsuka, S. Hayashi, T. Nagatomi, K. Watanabe, Vibrational motion control for foamed polystyrene machining robot and extraction of radius of curvature for fuzzy feed rate control, Artificial Life and Robotics, Vol. 20, No. 3, pp. 197-202, 2015.

DOI:10.1007/s10015-015-0221-1

[5]F. Nagata, S. Hayashi, T. Nagatomi, A. Otsuka, K. Watanabe, M.K. Habib, Robotic Trajectory Following Controller with a Capability for Generating Micro Vibrational Motion along Curved Surface, Procs. of the 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 765-770, Nov. 2015.

DOI:10.1109/IECON.2015.7392191

[6]F. Nagata, S. Hayashi, T. Nagatomi, A. Otsuka and K. Watanabe, Application of Fuzzy Reasoning and Neural Network to Feed Rate Control of a Machining Robot, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 7 pages, 2016.

[学会発表] (計8件)

[1] F. Nagata, A. Otsuka, K. Nakamura and K.

Watanabe, Proposal of a Machining Robot for Foamed Polystyrene Materials, Proceedings of 2nd International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering (InECCE2013), pp. 279-284, Hyatt Regency Kuantan Hotel, Kuantan, Malaysia, August 2013.

[2]中村, 永田, 大塚, 渡辺, 産業用ロボットののためのロボット言語を用いないCAMシステム, 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会(SI2013)講演論文集, pp. 1477-1482, 神戸国際会議場, 2013.

[3]大塚, 永田, 中村, CLデータの位置姿勢情報に基づく軌道追従制御器を用いた発泡スチロール加工ロボット, ロボティクス・メカトロニクス講演会2014講演論文集, 3P1-L01, 3 pages, 富山国際会議場, 2014.

[4]大塚, 永田, CLデータを用いたロボット加工システムへの速度調整機能の追加, 第32回日本ロボット学会学術講演会論文集, 3N1-06, pp. 1-4, 九州産業大学, 2014.

[5]永田, 大塚, 永富, 林, 渡辺, ボールエンドミルの進行方向に直交する微小振動制御を用いたカスプマークの除去加工法の提案, 第15回SICEシステムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 1185-1188, 東京ビッグサイト, 2014.

[6]F. Nagata, S. Hayashi, T. Nagatomi, A. Otsuka, K. Watanabe, Application of Fuzzy Reasoning and Neural Network to Feed Rate Control of Machining Robot, Procs. of The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2015), 2 pages, Awaji Yumebutai International Conference Center, Sept. 2015.

[7]F. Nagata, S. Hayashi, T. Nagatomi, A. Otsuka, K. Watanabe, Robotic CAM System to Efficiently Remove Cusp Marks along Curved Surface, Procs. of 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechanics for Information and Precision Equipment (MIPE2015), WeC-1-2, pp. 1-3, Kobe International Conference Center, June 2015.

[8]M.K. Habib, F. Nagata, T. Nagatomi, S. Hayashi, A. Otsuka, K. Watanabe, Vibrational Motion Control for Foamed Polystyrene Machining Robot and Extraction of Radius of Curvature for Fuzzy Feed Rate Control, Procs. of the 20th International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp. 776-780, B-Con PLAZA, Beppu, JAPAN, January 2015.

[図書] (計3件)

[1]F. Nagata, S. Yoshitake, K. Watanabe, M.K. Habib, Robotic CAM system available for both CL data and NC data, Engineering Creative Design in Robotics and Mechatronics, Chapter 15, pp. 265-276, IGI Global, 2013.

DOI: 10.4018/978-1-4666-4225-6.ch015

[2]F. Nagata and K. Watanabe, Controller Design for Industrial Robots and Machine Tools -Application to Manufacturing Processes-, Woodhead Publishing in mechanical engineering, 260 pages, Woodhead Publishing Limited, 2013.

[3]F. Nagata, A. Otsuka, K. Watanabe, M.K. Habib, T. Kusano, Industrial Machining Robot with Incorporated Robotic CAM System, Handbook of Research on Advancements in Robotics and Mechatronics, Chapter 25, pp. 793-817, IGI Global, 2014.

DOI: 10.4018/978-1-4666-7387-8.ch025

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

<http://www.ed.yama.tus.ac.jp/nagata/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永田寅臣 (NAGATA, Fusaomi)
山口東京理科大学・工学部機械工学科・教授
研究者番号 : 50435070

(2) 研究分担者

大塚章正 (OTSUKA, Akimasa)
山口東京理科大学・工学部機械工学科・助教
研究者番号 : 90611848

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

草野孝正 (KUSANO, Takamasa)

(有) SOLIC

〒836-0067 福岡県大牟田市四山町80番地42