

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13729

研究課題名(和文) 複雑立体造形における技能解明と次世代鋳造システムの構築

研究課題名(英文) Production skill elucidation for complex 3d forming and the next generation casting production system

研究代表者

田崎 良佑 (Tasaki, Ryosuke)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：70644467

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：生産現場の作業者は体験的学習から技能を身につけて駆使できる。この技の体系的な理解をなしに生産プロセスの自動化は達成されず、いまだ熔融金属の鋳込みなどを人手に任せるため、最終製品の信頼性が低い。本研究課題は液体の流れを操る生産技能の機械実装であり、研究の狙いは鋳造機械の進化的機構設計とこれに対をなす制御方法の確立である。ロボットのエンドエフェクタに高速制御モジュールを搭載し、ロボット側の不確定性を補償しながら制御対象に所望の作用を与える仕組みをつくっている。生産環境の変化を意識したコントロールが重要で、適応制御系を構築している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人の知能部分が計算技術で実現できるのではないかと考えられる現代の情報学と制御・鋳造・ロボットの工学の融合により、職人技能の理解と人工技能化の機械実装による次世代鋳造プロセスの進化的技術研究を推進した。本研究成果は、機械実装と機械の制御動作に学ぶ技能解析・抽出、本質的な理解とその人工技能化までの進展につながる。職人の技能・伝承、知能機械・ロボットの高度化への応用に拡張できる、学術・産業応用の両面で貢献度の高い研究成果である。

研究成果の概要(英文)：Workers at the production site can usually acquire skills from experiential learning. The automation of the production process cannot be achieved without a systematic understanding of this learning process, and the reliability of the final production is low because the casting of molten metal (metal filling) is still left to the manual. This task is the mechanical implementation of the skill of manipulating the flow of liquid, and the aim of the research is to design the evolutionary mechanism of the casting machine and to establish the control method. A high-speed control module is mounted on the robot end effector to create a mechanism that gives the desired motion to the controlled object while compensating for the uncertainty on the robot side. Control that is conscious of changes in the production environment is important, and we are constructing an adaptive control system.

研究分野：生産加工学、ロボティクス、システム制御

キーワード：知能ロボティクス 技能解明 制御系設計 生産プロセスオートメーション 金属生産プロセス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人の知能部分が計算技術で実現できるのではないかと考えられる現代の情報学と制御・鑄造・ロボットの工学の融合により、職人技能の理解と人工技能化の機械実装による次世代鑄造プロセスの進化的技術研究を推進する。複雑・複合的な鑄造プロセスの自動化すなわちロボット化は、流体(特に熔融金属)を取扱う工程に大きな課題を残す。その課題とは、熟練技能者が暗黙的に操作しながらも実現しているものづくり技術のシステム論的な定式化であり、例えば“適度に押し込む”“丁寧に塗る”などの流体の動的特性を操る技能を対象とする。これらの工程作業の高速・自動化へのニーズに対して、機械ないしはロボットに原則的な現実の物理世界を理解させて流体を意図するままに運動させるシステム制御方法の提案を研究の狙いとしている。

2. 研究の目的

鑄造プロセスにおける作業動作の人工技能化による新たなものづくりシステムの実現を主目的とし、機械設計、計測・制御系設計、技能実装とその統合化を進める。新開発装置に関わる要素技術をつぎに示す。各システム・成果は更に別プロセスへの波及性を検証する。

- ・ 鑄型の空洞：キャピティ姿勢の最適化計算法

計算流体力学にもとづく乱流要素抽出と評価アルゴリズムの提案による複雑設計技術

- ・ 付加製造技術を応用した高速砂型造形法

液体(接着剤)塗布の送り速度を動的制御する吐出幅可変調整による高速積層造形技術

- ・ 熔融金属加圧時の反力情報による鑄型内流動挙動推定手法

プレス充填中の動的反力計測と鑄型内金属温度・粘性・圧力・流動の状態検知技術

- ・ 流動安定化と加圧量最適化を考慮した予測型最適制御則

上昇流動する熔融金属流動の層流化と圧力調整のためのアクチュエータ動作制御技術

- ・ マクロマイクロ制御による高速フィードバック付加力制御則

ロボットアーム先端に工具把持・動作モジュールを搭載した高速高精度研磨制御技術

これら個々の学術研究成果の統合から成る新たな鑄造デバイスは、三次元形状データを持つ誰にでも容易に鑄造を利用でき、欲しい形状を直ぐに提供できる次世代ものづくりサービス技術の先駆けとなる。

3. 研究の方法

<プレス鑄造>

本研究では数理圧力モデルを用いた圧力挙動シミュレーションを行う。次に鑄型内圧力挙動を非接触で計測する手法を提案し、それを用いて金属溶湯と水を用いたプレス充填において圧力の計測を行う。それらの結果を比較することで、提案手法の有用性の評価及び、鑄型内圧力のソフトセンシングをする。図1に示す充填挙動推定にもとづく鑄型内圧力のフィードバック制御システムの構築及び、それを用いた高融点金属の高速・高品質成形を行う。

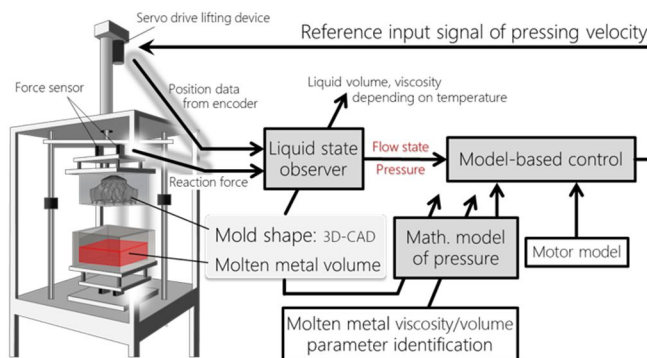


図1 プレスキャスト制御システム

<液体吐出式積層造形>

高速塗布制御システムによる積層造形の研究装置を新規に開発する。単一ノズルから積層平面にバインダ溶剤を塗布する際に、x-yテーブルの送り速度を動的に制御する。ノズルからの吐出量は常に最大(最短時間造形)とし、テーブル送り速度制御によって吐出幅の大小を可変に調整できる。塗布中液体に作用する圧縮・引張・放射流れ・屈曲・凝固のダイナミクスを数理モデル化し、逆問題を解く手法により実時間フィードバック制御系を構築する。多様化する塗布用溶剤の適用可能性を確認する。

4. 研究成果

< プレス鑄造 >

金属溶湯の圧力を接触式センサで計測することは困難であるため、溶湯反力を基に、非接触で推定することが望まれる。単純形状と、複雑形状についてプレス充填による成形を行い、金属溶湯の充填における圧力挙動を計測する。シミュレーションとの結果比較を行うことで、実際の溶湯充填でどのような現象が発生するかについても検証している。

金属溶湯を用いたプレス充填実験及び鑄型内圧力の推定と、プレス充填を想定したフィードバックシミュレーションを実施した。金属溶湯の充填においては単純形状の場合、圧力挙動はシミュレーションとおおむね一致するが、細長い流路を有する複雑形状の場合は流路の実質長さを考慮する必要があることがわかった。また、より高精度な推定のためには溶湯の凝固及び、上下鑄型のクリアランスからの溶湯の漏出への対策、実験装置の振動による影響の除去が必要であるという結論に至った。フィードバックシミュレーションにおいては、速度入力がPID制御の場合は曲線的になるのに対し、モデル予測制御の場合は直線的になることが確認された。そして、モデル予測制御システムを用いた場合に、出力応答のオーバーシュート量が小さく、目標値への収束が早い結果が得られた。溶融金属を用いた実証実験の結果より、実験装置に実装するにはサーボアクチュエータの動作による機械的振動問題を解決する必要がある。

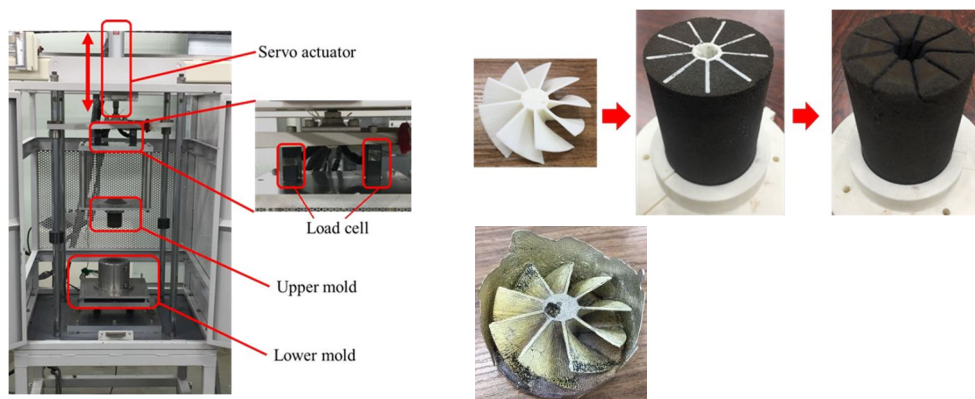


図2 プレスキャスト実験装置と3Dプリンタ応用砂鑄型および造形鑄物

< 液体吐出式積層造形 >

液体吐出式の高速度積層造形において造形精度の低下させることなく実現する。液体塗布動作制御システムの有効性を確認するために粘度の異なる材料を用いて定式化を行い、導出された塗布モデル式を用いて、小径ノズルを用いたときと同等の高い精度で高速造形が可能であることを確認した。また、提案する塗布制御動作設計を用いた高速高精度造形の多種材料適応性を向上するために、高速視覚フィードバック制御を提案した。高速度カメラを用いて線幅・肉厚をリアルタイムで計測し、目標値との偏差からクリアランスとノズル送り速度を修正し、造形精度を改善できている。

ノズル径を大型化し、ノズル送り速度を高速にすることで造形精度を低下させることなく高速造形を行う方法を提案した。本研究の提案システムの汎用性を確認するために異なる粘度の材料を用いて塗布動作から流出液体までの入出力関係式を導出し、その有効性を実験的に確認した。また、粘度が異なる場合においても小径ノズルと同等の精度で高速造形が可能で、粘度 $8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ の造形速度が4.27倍高速化でき、粘度が $50 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ の時造形速度4.46倍も高速化された。

視覚フィードバックを用いたノズル運動制御による高速積層造形
キーワード：高速造形・高速度カメラ・液体材料・大径ノズル

視覚フィードバックを用いたノズル運動制御による高速積層造形
キーワード：高速造形・高速度カメラ・液体材料・大径ノズル

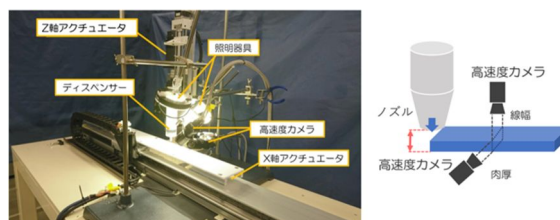
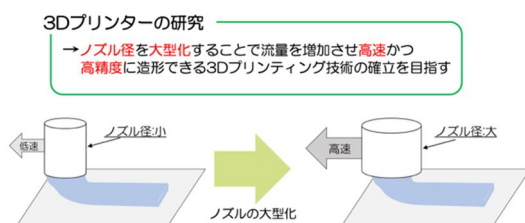


図3 液体吐出式高速3D積層造形実験装置とノズル運動制御方法

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 H.Sasatake, R.Tasaki, T.Yamashita, N.Uchiyama	4. 巻 15-5
2. 論文標題 Imitation Learning System Design with Small Training Data for Flexible Tool Manipulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 to appear
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 佐藤芳紀, 藤本正和, 梁景太, 加藤大貴, 田崎良佑, 大石 進	4. 巻 65,1
2. 論文標題 デスクトップ型 5 軸 NC 精密研削盤の 設計と試作ならびにその基礎加工特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 22-29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 田崎 良佑, 笹竹 晴萌, 藤本 正和, 寺嶋 一彦	4. 巻 91
2. 論文標題 未知形状バリの高速除去加工のための力覚フィードバック操作	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鑄造工学	6. 最初と最後の頁 781 ~ 787
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11279/jfes.91.781	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 R. Tasaki, H. Seno, K. Hashimoto, K. Terashima	4. 巻 925
2. 論文標題 Pressing Control Design Based on Analysis of Metal Temperature and Flow in Sand Mold Press Casting	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 491-498
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Ho, K. Suzuki, M. Tsume, R. Tasaki, T. Miyoshi, K. Terashima	4. 巻 84
2. 論文標題 A Switched Optimal Control Approach to Reduce Transferring Time, Energy Consumption, and Residual Vibration of Payload's Skew Rotation in Crane Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Control Engineering Practice	6. 最初と最後の頁 247-260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Ito, P. Oetinger, R. Tasaki, O. Sawodny, K. Terashima	4. 巻 925
2. 論文標題 Visual Nonlinear Feedback Control of Liquid Level in Mold Sprue Cup by Cascade System with Flow Rate Control for Tilting-Ladle-Type Automatic Pouring System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 483-490
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tasaki, R., Seno, H., Terashima, K.	4. 巻 15
2. 論文標題 Process design and control of greensand mold press casting using estimation of metal filling behavior	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Procedia Manufacturing	6. 最初と最後の頁 443-450
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 石川慎一, 山下貴仁, 田崎良佑
2. 発表標題 壁面こて塗り作業を想定したロボットアームによる押付け力制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021 in Osaka
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷口和輝, 笹竹晴萌, 山下貴仁, 田崎良佑
2. 発表標題 非接触流量計測を用いた特殊形状取鍋のフィードバック制御
3. 学会等名 日本鑄造工学会 第176回全国講演大会 学生オンライン講演
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊一成, 谷口和輝, 山下貴仁, 田崎良佑
2. 発表標題 特殊形状取鍋の数理モデルに基づく流量フィードフォワード制御による高精度注湯
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021 in Osaka
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taichi Shimura, Ryosuke Tasaki, Harumo Sasatake, Takahito Yamashita, Masakazu Fujimoto
2. 発表標題 Flexible Tool Manipulation for High-Accuracy Removal Processing of Unknown Shape Convex parts
3. 学会等名 IEEE 22nd International Conference on Industrial Technology, Industrial Automation, Communication, Networking and Informatics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田崎良佑
2. 発表標題 鑄造ロボットシステムのマルチタスク実行のためのモデル予測と模倣学習
3. 学会等名 日本鑄造工学会鑄造設備研究部会, スマートファクトリー実現に向けた鑄物生産技術の形式知化(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rintaro Suzuki , Ryosuke Tasaki
2. 発表標題 Model-based prediction and control of molten metal pressure inside sand mold in press casting process
3. 学会等名 Asia Pacific Measurement Forum on Mechanical Quantities (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田崎良佑
2. 発表標題 知技能ロボティクス研究の鑄造設備への応用
3. 学会等名 日本鑄造工学会鑄造設備研究部会, スマートファクトリー実現に向けた鑄物生産技術の形式知化 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榊原碧, 笹竹晴萌, Leong Choon Yip, 伊藤敦, 田崎良佑
2. 発表標題 視覚フィードバック機能を有する多軸ロボットを用いた注湯制御
3. 学会等名 日本鑄造工学会第174回全国講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木凜汰郎, 田崎良佑
2. 発表標題 プレスキャストにおける溶湯反力情報に基づく充填挙動推定
3. 学会等名 日本鑄造工学会第174回全国講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤芳紀, 藤本正和, 田崎良佑
2. 発表標題 卓上型5軸NC精密研削盤の試作と性能評価
3. 学会等名 日本機械学会第13回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shoji, A., Tasaki, R., Terashima, K.
2. 発表標題 High-Speed Additive Manufacturing Process Using Variable Motion Trajectory
3. 学会等名 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications, CCTA 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Duc Tho, H., Tasaki, R., Miyoshi, T., Terashima, K.
2. 発表標題 Optimal Control of Payload's Skew Rotation in Crane Systems with State and Control Input Constraints
3. 学会等名 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications, CCTA 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tasaki, R., Baba, J., Taniguchi, K., Terashima, K.
2. 発表標題 Pouring process control based on high-speed image analysis of liquid flow
3. 学会等名 73rd World Foundry Congress "Creative Foundry";, WFC 2018 - Proceedings (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------