

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01281

研究課題名（和文）画像領域分割による軌道計画・制御・検査の同時実現と3Dプリンタへの応用

研究課題名（英文）Simultaneous trajectory planning, control, and inspection by image region segmentation and its application to 3D printer

研究代表者

山川 雄司（Yamakawa, Yuji）

東京大学・大学院情報学環・学際情報学府・准教授

研究者番号：90624940

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高速な画像処理手法および視覚制御手法と新規駆動システムを開発することによって、新たな3Dプリンタシステムの実現を目指している。その実現のために、軌道計画からノズル位置制御、画像検査までを同時に実現する方法を提案している。特に、視覚センシング制御手法に関して、画像を複数の注視領域に分割することにより、分割領域毎に異なる画像処理を行い、1枚の画像に対して複数の画像処理を高速かつ並列に処理する方法を提案した。これにより、計画・制御・検査を1ミリ秒毎に同時に実行することを可能にした。これらの提案技術と開発システムを用いて、実際に3D造形実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の3Dプリンタの多くは、基本的に与えられた形状モデルに対して、軌道生成等の調整を行い、フィードフォワード制御によって実現されている。そのため、造形中における経路変更、環境の変化への対応や造形中の検査などが困難な状況にある。それに対して、本研究による成果は、フィードバック型であり、造形中において経路変更や外乱に対する対応、さらには検査を同時に実現した技術である。特に、高速性と高精度性を両立したシステムを開発したことにより、実時間で、造形速度を低下させることなく実現した点も実用性の高い技術である。このように、上述した課題解決に限らず、3D造形技術の性能向上に資する技術である。

研究成果の概要（英文）：This research aims to realize a new 3D printer system by proposing methods of high-speed image processing and high-speed visual feedback control and developing a new actuation system. To achieve this, we propose a method of simultaneous trajectory planning, nozzle position control, and inspection. In particular, regarding visual sensing control method, we divide the image into regions of interest, and we performed different image processing for each region. As a result, we achieved simultaneous trajectory planning, control, and inspection every 1 milliseconds. We also conducted 3D printing experiments using the proposed technology and the developed system to confirm the effectiveness of the proposed methodology.

研究分野：ロボティクス

キーワード：高速画像処理 高速視覚制御 画像領域分割処理

## 1. 研究開始当初の背景

現在の3Dプリンタは、基本的に、事前に形状モデルが必要であり、その形状モデルに基づいて動作計画(軌道生成)が行われ、その軌道に沿うようにノズル制御が行われている。そのため、ユーザーが厳密な形状モデリングをする必要がある、そのモデリングに沿った経路のみ対応、産業用途では製造後に製品の検査が不可欠であるが、製造途中での検査ができない、環境の変化(経路変更、外乱等)に対応できないといった様々な課題がある。これらに共通する根本的問題は“フィードフォワード制御でしか実現できていない”ことに集約される。しかしながら、これに対する具体的な方法論が提案されていないのが現状のようである。そのため現在は、システムの性能および熟練者のノウハウと知識によって解決しているのが実状のようである。また、人工知能技術等の研究開発が進み、作業の自動化や高効率化が要求されている中で、生産システム分野においては画期的な新技術は創出されていない。多品種少量生産型が進む中で、従来のモデルベースの教示再生およびフィードフォワード制御には限界があり、フィードバック型への新展開およびそれを実現する新規手法の提案が必要である。特に、3Dプリンタの場合には、切削加工のような接触状態での作業ではなく、非接触状態での作業であり、画像処理による状態認識および視覚フィードバック制御が不可欠であるが、ロボット制御等に実装されている多くの手法は画像処理および制御のサンプリングレートが低速である。そのため、3Dプリンタへの実装は不可能であり、実現には高速な視覚計測・制御の革新的手法が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、1.の研究背景に記した問題点の解決を目標に、高速画像処理技術および高速視覚制御技術を駆使し、独自に開発する手法と新規システムによって、軌道計画からノズル制御、画像検査までを一気通貫で実現する新技術を開発することを目的とする。

その実現のために、視覚センシング制御手法提案、デバイス開発およびシステム統合を行う。特に、視覚センシング制御手法に関しては、これまで1枚の画像に対して特定のタスク1つ(画像処理)だけが行われてきたが、本研究では画像を注視領域(ROI(Region of Interest)設定)に分割することで、分割領域毎に異なる画像処理を行い、1枚の画像に対して複数のサブタスクを高速かつ並列に処理することにより、計画・制御・検査を1ミリ秒毎に同時に実現する。

## 3. 研究の方法

主に次の4つの課題について研究を行った。

### (1) 高速カメラ画像の領域分割による軌道計画・位置制御・検査の同時実現

高速カメラから得られる画像を3分割し、各領域を並列かつ高速に画像処理するアルゴリズムを提案し、軌道計画・位置制御・検査に必要な画像特徴量を抽出・計算する方法を提案する。高速画像処理技術を駆使することにより、1秒間に1,000枚の画像処理を実現し、その処理結果はセンサ入力情報としてシステム制御に活用する。

### (2) 高速視覚制御ベースド駆動モジュールの新規開発

(1)の高速処理結果が効果的に機能する高速・高精度で制御可能な高速視覚制御ベースド駆動モジュールシステム(高速カメラと高速アクチュエータの一体化)を開発する。特に、産業用ロボットの可搬重量の制限があるため、高速・高精度に加えて、重量を考慮した設計開発を行う。具体的な目標仕様としては、XY軸の2自由度、補償範囲(ストローク)45mm、産業用ロボットのダイナミクスを補償するための必要な性能を目指す。制御系としてはサンプリング1kHzを目指す。

### (3) 流量・速度制御を含む線幅・肉厚制御

本サブテーマでは、ノズルから吐出される材料の流量と速度を制御し、成型物の線幅および肉厚制御手法を提案する。具体的には、ノズル位置および材料の流量・速度制御を統合した方法を提案し、実験によりその有効性を検証する。

### (4) システム統合、全体システムと造形実験の評価

(1)~(3)をシステム統合し、高い整合性を有する全体システムを構築し、システムの性能評価実験を行う。実際に造形物の造形実験を行い、造形時における軌道計画、制御、検査の有効性・妥当性を実証するとともに、造形物の加工性能を評価する。

## 4. 研究成果

本研究の目標は、3.研究の方法に従って、フィードバック型の新たな3Dプリンタシステムを開発すること、およびそのシステムに対する画像処理手法と視覚制御手法を提案することである。具体的には、ハードウェアとして図1に示すようなシステム開発を行うとともに、ソフトウェアとしてシステム制御に必要な画像処理および制御方法の提案および実装を行った。これらを統合した上で、全体システムを構成し、評価実験を行った。

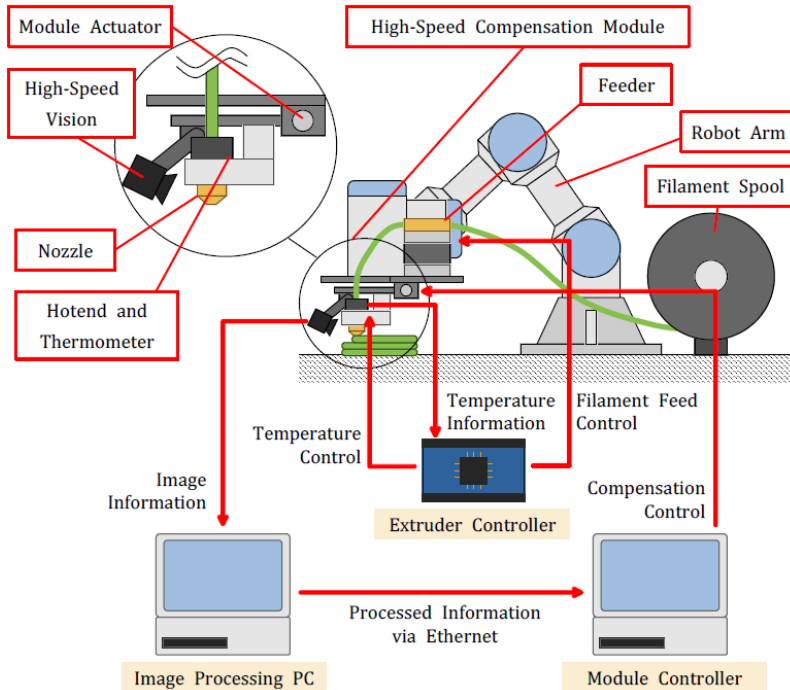
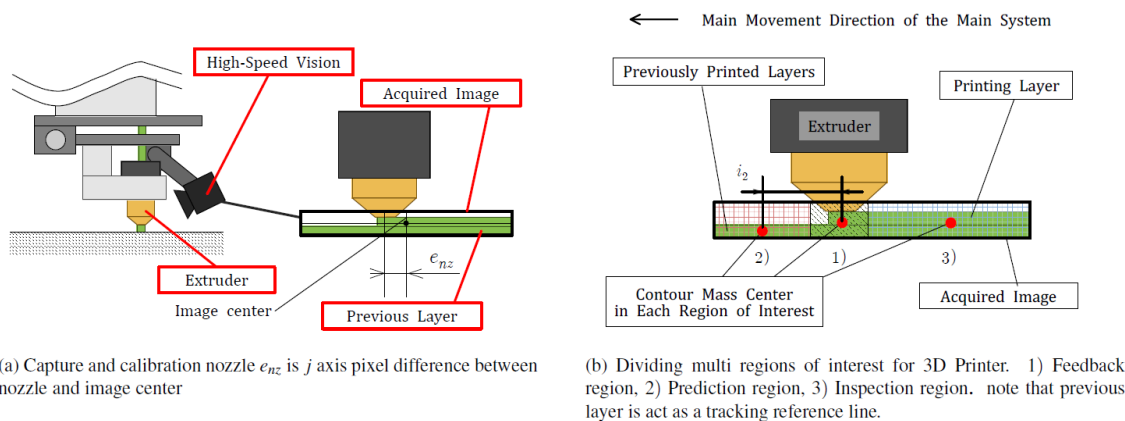


図1 ロボットアームと駆動モジュールで構成される3Dプリンタシステム [2]



(a) Capture and calibration nozzle  $e_{nz}$  is  $j$  axis pixel difference between nozzle and image center

(b) Dividing multi regions of interest for 3D Printer. 1) Feedback region, 2) Prediction region, 3) Inspection region. note that previous layer is act as a tracking reference line.

図2 カメラのセットアップと画像処理方法 [2]

### (1) 高速カメラ画像の領域分割による軌道計画・位置制御・検査の同時実現

ロボットの進行方向に対して高速カメラの画像を3分割し、各領域に対して並列かつ高速に画像処理するアルゴリズムを提案した(図2). 具体的には、ライントレーシングを想定し(FDM方式の3D造形への応用を考慮しており、積層済みの造形物から目標とするラインが認識できる)、軌道計画・手先位置制御・検査(追従結果)に必要な情報として、各領域におけるラインの中心位置を算出している. 3分割した領域に対する画像処理結果を用いて視覚制御系を構成し、ライントレーシングを目標タスクとしてロボットアームのみでトレーシングした結果を示したのが図3である. 提案手法を採用することにより、ライントレーシングに対する誤差を軽減できることが確認でき、提案手法の有効性が確認された. 特に、ロボットアームが高速に運動する場合には、その効果が大きく見られ、高速にロボットを運動させる際に、有効的に機能することがわかり、本研究の目的に対して大きく寄与することが確認できた.

### (2) 高速視覚制御ベース駆動モジュールの新規開発

(1)の高速処理結果を最大限に活用できる高速・高精度で制御可能な高速視覚制御ベース駆動モジュールシステム(高速カメラと高速アクチュエータの一体化)として開発したのが図3である. 特に、産業用ロボットへの搭載を考慮し、ロボットの可搬重量内での駆動モジュールを新規に設計し、開発した. また、本駆動モジュールの制御系も同時に構築した. 本駆動モジュールの有効性を確認するために、エンコーダ情報に基づく制御系と視覚情報に基づく制御系をそれぞれ構築し、目標位置または目標軌道(円形、四角形、三角形など)に対する性能評価を行い、結果として、十分な制御性能を有していることを確認した. 加えて、制御系としてはサンプリング1 kHzを実現した.

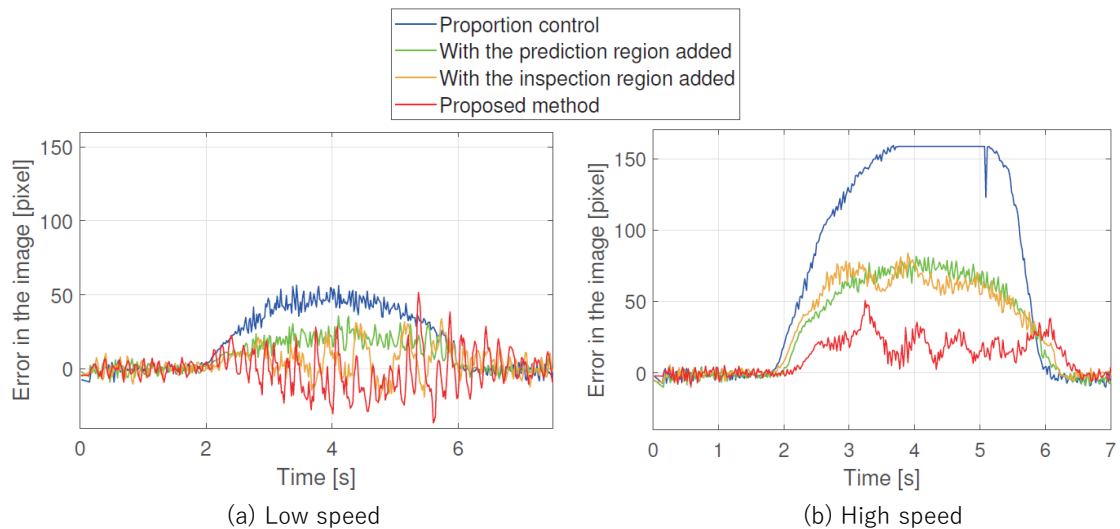


図3 軌道計画・位置制御・検査を利用したライトレーシング実験 [1]

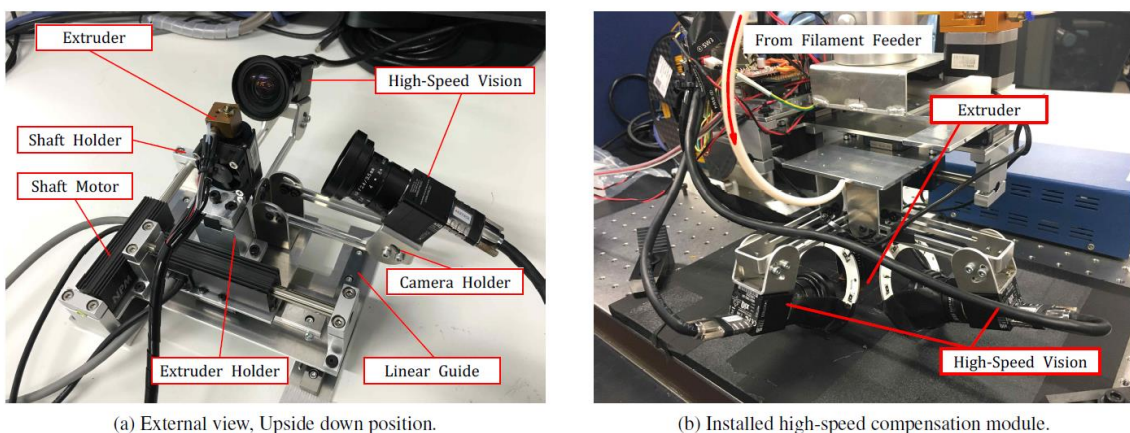


図4 駆動モジュール[2]

### (3) 流量・速度制御を含む線幅・肉厚制御

システムに設置された2つのカメラによってノズルを中心とした全方向の経路をモニタリングし、高速画像処理で得られる補正経路と所望経路を組み合わせることで、造形の失敗を抑制するための適正経路が生成される。樹脂材料を用いた造形実験において、視覚情報を基にした経路補正により失敗抑制効果を確認した。さらに、積層面の凹凸に対するノズル速度制御を用いた補修技術も実装し、深度カメラによる3次元計測と高さ方向の変化のフィードバックによって、凹凸表面に対する平滑化の積層の実現性を示した。ここで、凹凸の最大値を2.00 mmから0.58 mmに減少させ、71%の抑制効果に成功している(図5)。

### (4) システム統合、全体システムと造形実験の評価

(1)~(3)の要素をシステム統合した全体システムを構築し(図1)、システムの性能評価実験を行った。その後、実際に造形物の造形実験を行い、造形時における提案手法の有効性・妥当性を検証した。なお、図6は実験方法および造形フローを示している。

図7にロボットアームのみで造形した造形物(左)と提案手法を用いて造形した造形物(右)を示す。また、図8に造形物の側面写真を示す。図7および図8(a)からロボットアームのみの場合、出力不足による欠陥が発生して、それ以降の層の積層に影響を与えて、欠陥が拡大していることが分かる。また、図8(a)に示すように角の部分から始まり広がるような欠陥が多く見られることから、計算した理想の吐出速度であっても、角で激しく経路が変わるように速度変化が大きい場合は、吐出量不足が発生していると考えられる。吐出量の制御は提案した予測領域及び検査領域での吐出量不足欠陥検出手法を使用することにより、造形中に欠陥が検出された場合でも、同じ吐出速度および加速度でも図8(b)に示すように欠陥が少なくなり、欠陥が発生しても拡大することなく次の層で補うことができている。

以上のように、3Dプリンタの性能向上に資する技術を提案、実装し、実際に3D造形を可能にし、有効性を確認することができた。



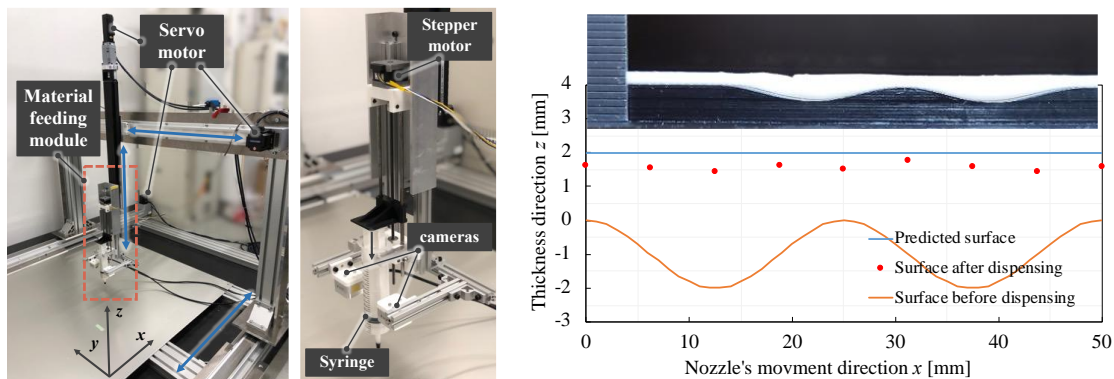
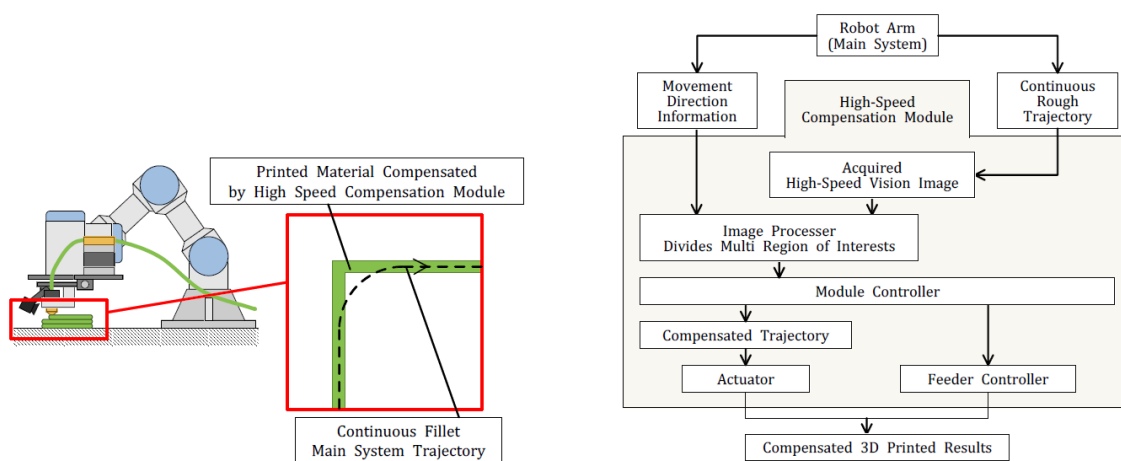


図5 深度情報を有するシステムとそれを用いたフィードバックによる凹凸面の補修



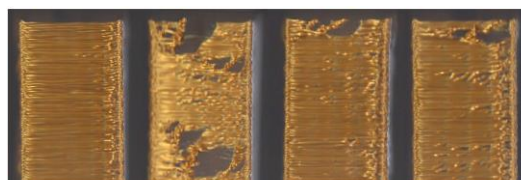
(a) Coarse-to-fine 3D printing strategy

(b) Workflow

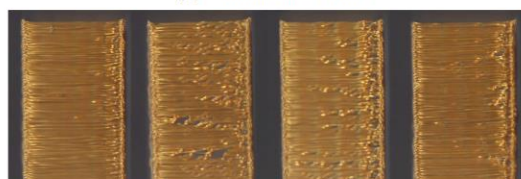
図6 実験方法と開発システムによる造形フロー[2]



図7 造形物[2]



(a) Without detection



(b) With detection and feeder speed feedback

図8 造形物の各側面の様子[2]

### 参考文献

- [1] Jinsung Ahn and Yuji Yamakawa: Full Utilization of a Single Image by Characterizing Multiple Regions of Interest for Line Tracing, 2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.1470-1475 (2022)
- [2] 安辰晟, 村上健一, 平野正浩, 山川雄司: 高機能 3D プリンティングのための動的補償システムの開発と評価, 日本機械学会論文集, Vol. 89, No. 928, Paper No. 23-00191 (2023)
- [3] Shinichi Ishikawa, Takahito Yamashita, and Ryosuke Tasaki: Vision-Based Monitoring and Control for 3D Printing Process with Dynamic ROI and Path Modification Algorithm, Journal of Advances in Information Technology, Vol. 14, No. 6 (2023)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Wang Taohan, Yamakawa Yuji	4. 巻 16
2. 論文標題 Real-Time Occlusion-Robust Deformable Linear Object Tracking With Model-Based Gaussian Mixture Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurorobotics	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnbot.2022.886068	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 安辰晟, 村上健一, 平野正浩, 山川雄司	4. 巻 89
2. 論文標題 高機能3Dプリンティングのための動的補償システムの開発と評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.23-00191	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 S. Ishikawa, T. Yamashita, R. Tasaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Vision-based Monitoring and Control for 3D Printing Process with Dynamic ROI and Path Modification Algorithm	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Advances in Information Technology	6. 最初と最後の頁 1443-1449
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.12720/jait.14.6.1443-1449	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 安辰晟, 山川雄司
2. 発表標題 複数関心領域を用いた経路予測・制御・検査に基づくライントレーシング
3. 学会等名 第40回 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ahn Jinsung、Yamakawa Yuji
2. 発表標題 Full Utilization of a Single Image by Characterizing Multiple Regions of Interest for Line Tracing
3. 学会等名 2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川慎一, 山下貴仁, 田崎良佑
2. 発表標題 積層造形プロセスにおける視覚フィードバックを用いた動作中の造形不良に対する経路補正
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田遼, 山下貴仁, 田崎良佑
2. 発表標題 液体吐出式積層造形プロセスにおける塗布動作制御による経路上の凹凸面の補修技術
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾瑛, 山川雄司
2. 発表標題 高速ビジョンと機械学習を利用した高速物体認識・追従システム
3. 学会等名 第22回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 趙楠, 山川雄司
2. 発表標題 複数マーカーを用いたパンチルトカメラの高精度運動学モデル
3. 学会等名 第22回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

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 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinichi Ishikawa, Ryosuke Tasaki
2. 発表標題 Visual Feedback Control of Print Trajectory in FDM-type 3D Printing Process
3. 学会等名 2023 8th International Conference on Control and Robotics Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川慎一, 田崎良佑
2. 発表標題 精密3Dプリンティングのための吐出液体の状態観測とモーション制御
3. 学会等名 日本鑄造工学会第181回全国講演大会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Shinichi Ishikawa, Takahito Yamashita, Ryosuke Tasaki
2. 発表標題 A Robust Path Planning Approach by Vision-Based State Observation for FDM Type 3D Printing Process
3. 学会等名 20th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shinichi Ishikawa, Ryo Yamada, Takahito Yamashita, Ryosuke Tasaki
2. 発表標題 Dynamic Additive Manufacturing Based on Real-time State Observation and Visual Feedback by a 3D Sensing System
3. 学会等名 16th Asian Foundry Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Nomura, Kazuma Tanaka, Takanori Yamazaki
2. 発表標題 Design of Acceleration Command for Feed Drive System in Corner Motion
3. 学会等名 20th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究 分担者	山崎 敬則  (Yamazaki Takanori)  (80342476)	東京電機大学・理工学部・教授    (32657)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	田崎 良佑  (Tasaki Ryosuke)  (70644467)	青山学院大学・理工学部・准教授     (32601)	

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