

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20314

研究課題名（和文）柔軟な粘土素材を用いた高速立体造形手法

研究課題名（英文）High-Speed 3D Printing Method using Flexible Clay Material

研究代表者

山岡 潤一（YAMAOKA, JUNICHI）

慶應義塾大学・メディアデザイン研究科（日吉）・専任講師

研究者番号：60838697

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：デジタルファブリケーションにおける立体造形の高速化を目指し、粘土状の素材を変形させて立体物を造形する高速造形手法の研究を行った。低融点樹脂と鉄粉を混ぜた変形可能な磁性樹脂の開発およびリニアアクチュエータと磁石を用いた磁性樹脂の制御装置を開発した。この成果は、SIGGRAPH2020にて発表した。また、水面上に任意の数字を表示するFloating Pixelsを開発した。これは磁性樹脂を用いて3D印刷した磁性球を水面に浮遊させ、下から磁石を取り付けた複数のアクチュエータを制御して、任意の数字を表示する。シンガポールにて常設展示を行ったり、本研究は国内外の学術およびアート領域で発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

個々人に適した物品を多品種少量生産可能な新しいデジタルなものづくり環境として、3Dプリンタなどのデジタルファブリケーション技術が研究開発されている。しかし現在の3Dプリンタは多くの造形時間を要することや素材が繰り返し使用できない課題がある。本提案は、粘土状の素材を変形させて立体物を造形することで、立体造形の高速化を実現できる。また、研究成果は、立体製造技術に繋がる科学的な知見を得ることができ、今後のさらなる高速化、高解像度化、立体精度の向上に繋がることが期待される。

研究成果の概要（英文）：We researched a high-speed fabrication method to deform clay-like materials to create three-dimensional objects, in order to achieve high-speed three-dimensional fabrication in digital fabrication. We developed a device to control the deformable magnetic resin by mixing low-melting-point resin and iron powder and by using a linear actuator and a magnet. These results were published at SIGGRAPH2020. We also developed Floating Pixels, which displays arbitrary numbers on the surface of water. The magnetic spheres printed with magnetic resin are floated on the surface of the water, and multiple actuators with magnets attached are controlled from below to display arbitrary numbers. The work has been exhibited permanently in Singapore, and these researches have been presented at international and domestic academic and artistic conferences.

研究分野：ヒューマンコンピュータインタラクション

キーワード：デジタルファブリケーション 3Dプリンタ ものづくり 高速造形 メディアアート

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、3Dプリンタ等のデジタルファブ리케이션が普及し始めて、日本政府提唱による科学政策の基本方針であるソサエティー5.0でも、個々人に適したオブジェクトを多品種少量生産可能なデジタルなものづくり環境が要素技術として挙げられている。

しかし現在普及している3Dプリンタ等の立体造形技術は、樹脂を軟化させて積層(FDM方式)させるため、多くの造形時間を要することが課題である。高速な立体造形手法は、瞬時に立体物を造形できるため輸送コストの削減に繋がり、さらに試行錯誤の回数も向上するため、試作品の質も向上する。立体造形の高速化の研究として、紫外線硬化型樹脂とモニタを用いた連続液界面3Dプリント技術 [1]は、一時間に500mmの速度で立体物を出力する。申請者も、真空成形法とピンディスプレイを用いて半立体形状を短時間で造形するProtoMold [2]やレーザーカッタを用いて高速に複雑なインフレータブルオブジェクトを造形する手法 BlowFab [3]等を提案しており、高速造形技術において世界的にリードしている。

一方で、樹脂を軟化させて一層ずつ積層する従来の立体造形手法は、造形速度の限界がある。そこでRadical atoms [4]では、将来的には、必要な場面に応じて、素材自体が瞬時に変形するコンセプトが提唱されている。素材自体が変形することで、短時間で形状を確かめることが出来、材料も再利用可能であるため資源のロスも少ない。このような立体造形手法技術の実現のためには、制御可能な新素材の開発と理論化、その素材を制御するための装置の開発および形状設計のためのインタラクションの考案といった、学問領域横断的な問いを解決する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、粘土状の素材の形状を動的に制御する、高速立体造形手法の開発を目的とする。本研究のシステム構成は、動的に変形する粘土状素材、磁力制御装置および形状を操作するインタフェースからなる(図1a)。

例えば、蠟(パラフィンワックス)の融点は約60度であり、固体と液体の状態を切り替える事ができる。そのような熱可塑性樹脂に磁性体を混合することで、軟化時において磁力によって形状を制御することができる。制御部は、複数の電磁石とヒータが配置された装置である。ヒータによって磁性熱可塑性樹脂を液体状に溶かし、任意の電磁石を起動させて、予め設定したパターンに磁力を発生させる。磁性熱可塑性樹脂が電磁石に集まり、ヒータを止めることで樹脂が硬化して取り出すことができる。

ユーザは、パソコンの画面上で任意の形状のモデルを設計して、硬化した素材を装置部に載せた後、暫く待つと樹脂が軟化して、設計したモデルの形状に変形する。例えば、スマートウォッチのモデルを作成して、素材を制御部に置いて待つことで、短時間で試作を手にすることができる(図1b)。さらに再加熱することで元に戻せ、軟化している間に手作業で形状を変更することができる。

これまでの先行研究では、エラストマ等の伸縮性のある素材を用いた動的に変形するオブジェクトが提案されていたが、変形できる形状の制約はある。それに対し本研究の独自性は、一度の工程で素材自体を動的に変形させる造形高速化のアプローチである。

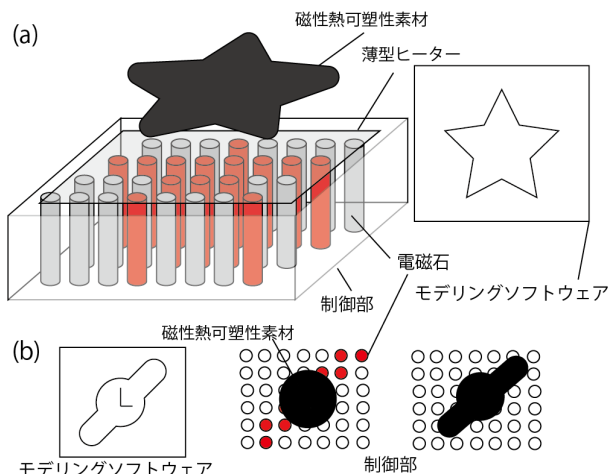


図1：システム図

3. 研究の方法

本研究で取り組む課題は、素材の検討、制御部の開発、インタラクションの検証という3つの要素からなる。これまで申請者は素材の特性を活かしたインタフェースを提案してきた。粘土の持つ導電性に着目した粘土インタフェース NeonDough [5]は、導電性のある小麦粘土内部に電子回路やセンサ、LED が内蔵されており、モジュールに内蔵された電極間の抵抗値を計測し、各モジュールのフルカラーLED の色を変化させる。くっつけると色が混色され、伸ばすことで緩やかに色が変わる。本研究でも、素材の特性を理論化して、事前にシミュレーションすることで、最適な形状を作り出すことができる。まず本研究では、粘性や磁性体の割合、融点の温度設定等の素材としての最適な配合を探る。様々な配合を実験した後、本ツールに最適な素材を決定する。さらに磁力と形状の関係性を調査する。素材は液体状になるので、自重で垂れてしまう。モデル通りの形状にするため、素材量、磁力の分布、電磁石の起動タイミング等をシミュレーションする必要がある。それぞれの変数に対して変形との関係性を実験し、データ分析を行い、理論を構築する。その後、シミュレーションソフトウェアを制作して、最適な素材と電磁石の制御を行う。

さらには導電性を付加することで形状の状態をより正確に検知する、変色インクを混合することで熱に応じて素材の色を変化させる、素材内部に回路や電子部品を入れることで造形物に機能を付加する等の応用について検討する。

また電磁石を配置した制御部は、最適な磁力の検討や配置を検証する必要がある。造形の高速化のためには、ヒータ部の熱の瞬時的な切り替えは必須である。また現在の草案では、出力される形状は2.5次元であるが、高さ方向にも磁力を発生させることで、三次元形状を高速で出力する方法を模索する。

形状を設計するインタラクションは、幾つかの入力方法（画面のモデリングソフトウェアを介した設計、ジェスチャ入力、ポインタ入力等）を実装し、ユーザにそれぞれのインタラクションを体験してもらい、本ツールに最適な入力方法を探る。また3Dプリンタ等の既存技術との造形時の操作性や試作品の比較調査も行い、本研究の有用性を証明する。

4. 研究成果

本研究代表者は、デジタルファブリケーションにおける立体造形の高速化を目指し、粘土状の素材を変形させて立体物を造形する高速造形手法の開発を進めてきた。低融点樹脂と鉄粉を混ぜた変形可能な磁性樹脂の開発およびリニアアクチュエータと磁石を用いた磁性樹脂の制御装置の開発を行った（図2）。この成果をまとめ、SIGGRAPH2020 Poster に採録され、発表した。ラピッドプロトタイピングの可能性を広げるといったコメントや、他の代替可能な素材を提案してもらいなど、多くのフィードバックを得ることができた。

この成果を元に、水面上に任意の数字を表示する Floating Pixels(図3)を開発した。これは磁性樹脂を用いて3D印刷した磁性球を水面に浮遊させ、下から磁石を取り付けた複数のリニアアクチュエータを制御して、任意の数字を表示する。これはシンガポールで行われたデザインに関する展示会 Design Superposition で、3ヶ月間の常設展示を行った。この成果は取材によるドキュメンタリー映像としてまとめられ、現地の観客は実際に水面を覗き込みながら楽しむ様子が見られた。また、2022年5月末まで、日本テレビ本社内でも次世代のディスプレイ技術のデモンストラーションとして常設展示されている。今後は本技術を次世代テレビへの応用として開発を進める。

現在は、複雑な形状を表現するために、複数のリニアアクチュエータのピンディスプレイを開発している。6x6の2cm角のリニアアクチュエータを用いて、従来よりも高解像度の情報を表示することができている。

さらに、本提案のコンセプトを応用して、様々な分野への応用を実施している。例えば、マトリクス状に物体を配置する手法は、発光素子と光ファイバを用いて、任意の光る紐状立体を作る手法へ応用し、主に幾何学を学ぶ学習ツールを開発している。これはSIGGRAPH ASIA 2021にて発表した。また本手法で利用した磁性導電性ビーズを柔らかい膜に包むことで、柔軟に変形できる柔らかいインタフェースを開発した。これは外側の膜と内側のビーズを複数材料を扱える3Dプリンタを使用して、組み立て無しで印刷可能である。印刷後は、内部の空気を吸引することでジャミング転移現象を利用して、硬さの変化と形状を固定できる。これはTEI 2022にて発表している。また入力だけではなく、出力として、粘土内部にアクチュエータを内蔵して、粘土の形状を自由に変形できる手法についても取り組んだ。これらの成果は、WISS2020にて発表を行った。インタフェースのみならず知育玩具やパフォーマンス利用への可能性を提案して頂いたり、効率的に形状を認識できるアルゴリズム手法を教示してもらいなど、多くのフィードバックを得ることができた。

今後は、採択されている若手研究の継続研究に接続する形で、これまでの成果をより発展させることを検討している。具体的には、これまでの、平面のみの表現だったが、高さ方向へ積み上げるような機構を考え、立体的な印刷へ繋げることを検討している。さらに、高解像度化を目指す

ために、現在複数のリニアアクチュエータを用いたピンディスプレイを開発して、即座に成果に繋げる準備をしている。
また本コンセプトの応用も同時並行で検討しており、柔軟な紐状素材や、形状記憶樹脂など、様々な素材特性を組み合わせながら、研究目的の実現に向けて手法を確立させるとともに、製品化にも取り組み社会実装を目指す。さらには、研究のみならずアート領域の作品として展示することも考えている。

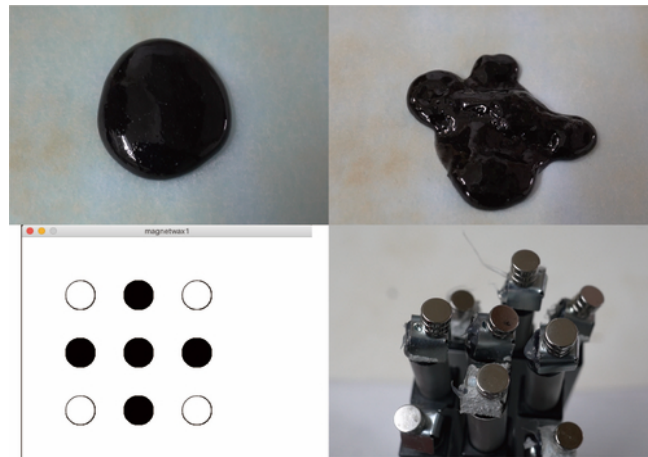


図 2 : 磁性体を用いた形状変形装置 (SIGGRAPH 2020 採択研究)



図 3 : Floating Pixels

1. John R. Tumbleston, et al. Continuous liquid interface production of 3D objects, Science 20 Mar 2015: Vol. 347, Issue 6228, pp. 1349-1352
2. Junichi Yamaoka, et al. ProtoMold: An Interactive Vacuum Forming System for Rapid Prototyping, CHI 2017, Pages 2106-2115.
3. Junichi Yamaoka, et al. BlowFab: Rapid Prototyping for Rigid and Reusable Objects using Inflation of Laser-cut Surfaces. UIST '17, 461-469.
4. Hiroshi Ishii, et al. Radical atoms: beyond tangible bits, toward transformable materials, interactions Interactions Homepage archive Volume 19 Issue 1, January + February 2012 Pages 38-51.
5. 山岡潤一, 筧康明, NeonDough : 導電性粘土を用いた光る粘土細工, ヒューマンインタフェース学会論文誌 14(4), 341-350, 2012-11-25.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Junichi Yamaoka
2. 発表標題 Rapid and Shape-Changing Digital Fabrication Using Magnetic Thermoplastic Material.
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH 2020 Posters (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 榎 麻衣, 山岡 潤一
2. 発表標題 粘土とモジュール式の芯材を用いたデジタル知育玩具の提案
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会インタラクティブシステムとソフトウェア (ISS) 研究会 WISS 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梁 文碩, 山岡 潤一
2. 発表標題 直感的なサウンドデザインのための柔軟な音楽インタフェースの提案
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会インタラクティブシステムとソフトウェア (ISS) 研究会 WISS 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Emi Kusano, Junichi Yamaoka
2. 発表標題 Instababy generator
3. 学会等名 SIGGRAPH ASIA 2019 Art Gallery (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Arooj Zaidi and Junichi Yamaoka
2. 発表標題 TIEboard: Developing Kids Geometric Thinking through Tangible User Interface.
3. 学会等名 SIGGRAPH Asia 2021 Posters. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Munseok Yang and Junichi Yamaoka
2. 発表標題 MultiJam: Fabricating Jamming User Interface using Multi-material 3D Printing.
3. 学会等名 In Sixteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '22) (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------	---------