

研 究 報 告 書

「デジタルファブリケーションによる生体模倣インタフェースの構築」

研究期間：2020 年 4 月～2022 年 3 月

研究者番号：50248

研究者：鳴海 紘也

1. 研究のねらい

これまで、Human-Computer Interaction (HCI)やロボティクスの分野では、生体で言うところの神経のような機能を実現するために導体などによるセンサが用いられ、また筋肉のような機能を実現するために様々な種類のアクチュエータが用いられてきた。そこで私は、このような生体のアナロジーを拡張し、神経や筋肉以外の、従来あまり利用されてこなかった生体機能をインタフェースやロボットシステムに組み込むことで、新しいインタラクションやファブリケーションの手法を実現しようとした。

まず本研究期間の前身にあたる ACT-I「情報と未来」の加速以前のフェーズでは、生体模倣の 1 つの側面として、例えば人間の肌のように一度傷ついても勝手に修復する自己修復素材を用いたインタフェースを研究した。

そして本研究期間に該当する加速フェーズでは、生体模倣の別の側面として、例えばサナギが成虫に変わるような生体の形態変化に着目し、自己組み立て(Self-assembly)や折り紙およびそれらを支援するインタフェースの研究を行った。

より具体的には、大きく分けて 3 つの研究を実施した。発表タイミングの都合上、研究詳細は Pop-up Print について公開する。

- **Pop-up Print:** 背の高い構造物を 3D プリントする際に問題となる、長い造形時間と大量のサポート材消費を回避するために、3D モデルをカブトムシのサナギのように折りたたんだ状態で印刷し、印刷後に構造物を展開する手法

2. 研究成果

(1)概要

前述の通り、本研究では生体の形態変化を模した自己組み立て(Self-assembly)や折り紙に関して 3 つの研究を行った。発表タイミングの都合上、研究詳細は Pop-up Print について公開する。

- **Pop-up Print:** 背の高い構造物を 3D プリントする際に問題となる、長い造形時間と大量のサポート材消費を回避するために、3D モデルをカブトムシのサナギのように折りたたんだ状態で印刷し、印刷後に構造物を展開する手法

(2)詳細

研究テーマ 1: Pop-up Print

－ 研究背景

3D プリンタで大きな構造物を作製する際には、3 つの点が問題となりやすい:

1. 長い造形時間。造形方式にもよるが、一般的に 3D プリンタは水平方向に大きな構造物よりも垂直方向(Z 方向)に背の高い構造物を印刷する際に長い時間を要する
2. 大量のサポート材消費。造形方式にもよるが、3D プリンタの中にはオーバーハングなどを精度よく印刷するためにサポート材と呼ばれる材料を印刷する機種がある。このようなサポート材は印刷が終わったあとで取り除かれ廃棄される。そのため、サポート材がいたずらに増えることは、完成物のクオリティとは無関係に環境負荷を増大させる。
3. 低い収納性。現状の 3D プリンタの一般的な用途が試作であるため、ユーザはたくさんの方の構造物を印刷することがあるが、大きな構造物はかさばるため収納に困る。

一方、生物の変態に目を向けると、カブトムシはサナギの状態ですでにツノなどの構造を「折りたたんだ」膜として格納しており、成虫になるときにその折りたたまれた膜構造に体液を注入することで最終的な形状を得る。つまり、ツノはあらかじめ折りたたまれた状態で作られている。これを逆折り紙と呼ぶこともある。

本研究は、このような生体の逆折り紙を背の高い構造物の 3D プリントに応用したものである。つまり、3D プリンタに入力するモデルのデータを適切に折りたたんだ形状に変換しておき、印刷に必要な時間やサポート材消費を低減する。そして、印刷が完了したあとで造形物を展開することで、当初必要だった形状に復元する。この折りたたみと展開は繰り返し行うことができるため、使わないとき・収納するときだけたたんでおくというような利用法が可能となる。

結果

図 1 は、Pop-up Print の処理の概要である。まずユーザは折りたたみ前の STL ファイルを入力する(図 1a)。すると、ソフトウェアは折りたたみ可能な領域を赤で可視化する(図 1b)。その際ユーザはモデルを回転するなどして、好みの折りたたみ角度などを指定することができる。その後、ソフトウェアはモデルを折りたたみ(図 1c)、3D プリントに必要な素材の割り当てを行う(図 1d)。本研究では、構造物の中でも折りたたみの際にたわむ部分は黒の柔軟素材で出力している。なお、本手法では、大雑把に言った場合「先細り」の部分の折り返すことでたたみを実現しているが、図 2 に示すように入力が折りたたみに適さない非先細り形状だった場合でも、ソフトウェアが元の形状をなるべく維持しながらモデルを折りたたみ可能な形状に修正することもできる。

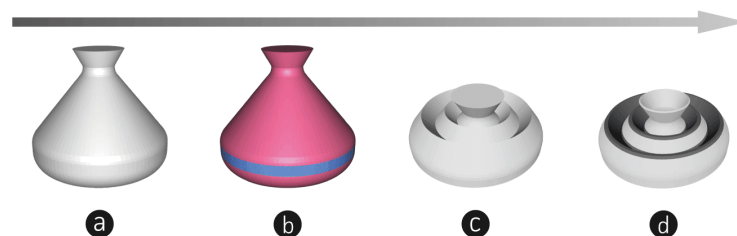


図 1: Pop-up Print の処理の流れ

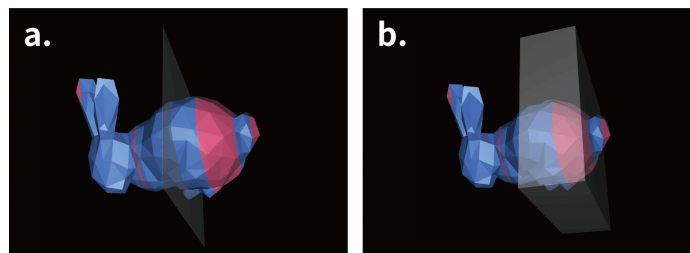


図 2: 折りたたみ不可能な領域をユーザが選択することで、形状を大きく変えることなく折りたたみ可能な形状に修正することができる

図 3 は、折りたたみ前のモデルと折りたたんで印刷された実際の構造物の例である。徳利や Huffman's Cone のようにたたむのが簡単な形状の他に、Stanford Bunny のような一般的なモデルでも折りたたみが可能なことが示された。また、最大で印刷時間とサポート材消費量の双方をもととのモデルの 50%以下に抑えられることがわかった。さらに、(実装の詳細は省くが)造形物は折りたたんだ状態と展開した状態の両方で機械的に安定するように設計されており、必要のないときには畳んで収納することが可能であることも確認した。

	name	properties ^{*1}	view of design tool	printed objects
a	Tokkuri (& Choko)	<i>without folding</i> print time: 10 h 24 min support: 477 g <i>folded</i> print time: 5 h 20 min support: 342 g		
b	Huffman's Cone	<i>without folding</i> print time: 15 h 13 min support: 741 g <i>folded</i> print time: 3 h 27 min support: 139 g		
c	Starfish	<i>without folding</i> print time: 3 h 22 min support: 108 g <i>folded</i> print time: 2 h 39 min support: 106 g		
d	Two-hump Dome	<i>without folding</i> print time: 3 h 38 min support: 124 g <i>folded</i> print time: 1 h 57 min support: 59 g		
e	Stanford Bunny	<i>without folding</i> print time: 7 h 16 min support: 149 g <i>folded</i> print time: 5 h 25 min support: 141 g		

^{*1} Print time and support consumption was obtained from the simulation result of Objet 260 Connex 3 (Digital Material Mode, computed after auto replacement).

図 3: たたむ前のモデルと、畳んだ状態で印刷した構造物の例

3. 今後の展開

研究提案の時点で私が目標としたのは、生体の形態変化に着目した、変形機構を利用するインタフェースの開発である。そしてこの研究期間に生み出された3つの研究成果は、カブトムシの変態などに見られる「逆折り紙」から着想を得るファブリケーション手法である。Pop-up Print で示したような「折りたたんだ状態」での3Dプリントは、大きな構造物の作製に必要な時間と素材を低減し、効率的かつサステナブルな造形を実現できるという観点で有用である。また、キャンプなどに用いられる折りたたみ式のコップを一般的な形状に拡張したものとも考えることもできるため、高い収納性を持つ形状の実現方法としても有効だと思われる。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

加速フェーズ以前は生体の自己修復に着目したインタフェースに取り組み、本加速フェーズでは生体の形状変化に着目したファブリケーション手法に取り組んだ。当初提案として記載していた「逆折り紙の3Dプリント」「インクジェット印刷による自己折り」はそれぞれ Pop-up Print と Inkjet 4D Print のプロジェクトとして達成できた。

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

ACT-I 開始時には博士学生であったが、助教などを経て現在は特任講師の身分となっていることもあり、研究実施には学生の協力を得ることになった。研究費執行状況に関しては、COVID-19の蔓延により研究が遅延したことや海外渡航が不可能になったことなどにより、当初の予定より遅れた。

・研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果(今後の見込みも重視してください。)

Crane や Inkjet 4D Print は、論文の発表順調整や権利化の都合によりなかなか公開できない状況が続いていたが、その分インパクトの大きい成果になったと考えている。すでに折り紙やファブリケーションを専門とする大学の教員や企業からは非常に高い評価を受けており、産業化の可能性は高いと考える。現状、Self-folding 技術を産業レベルで実現している例はほぼ存在しないため、大きな波及効果が期待できる。

・研究課題の独創性・挑戦性

もともとは Human-Computer Interaction、ソフトロボティクス、マテリアル工学などの融合領域で研究を実施していたが、本研究期間で計算機折り紙とCGの分野に参入することができた。特に、これまで任意の水密な折りを実現できるアルゴリズムなどは知られていたが、幅広い折りパターンの「デジタル・ファブリケーション」という観点では、世界的にも独創的かつ挑戦的な研究になったと考える。成果発表が一通り済んだ段階で、「折り紙ファブリケーションの分野を開拓した」という評価を得られることを願う。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Yuta Noma, Koya Narumi, Fuminori Okuya, Yoshihiro Kawahara. Pop-up Print: Rapidly 3D Printing Mechanically Reversible Objects in the Folded State. Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST' 20), Pages 58–70, Virtual (previously Minneapolis, US), Oct. 2020, DOI: 10.1145/3379337.3415853
2. 野間裕太, 鳴海紘也, 奥谷文徳, 川原圭博. Pop-up Print: 双安定な折りたたみ 3D プリント. 第 28 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2020), Dec. 2020.
3. Junichiro Kadomoto, Takuya Sasatani, Koya Narumi, Naoto Usami, Hidetsugu Irie, Shuichi Sakai, Yoshihiro Kawahara. Toward Wirelessly Cooperated Shape-Changing Computing Particles. IEEE Pervasive Computing, 2020, DOI: 10.1109/MPRV.2021.3086035.

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 1 件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

招待講演

1. 鳴海紘也, Self-healing UI: 機械的かつ電氣的に自己修復するセンシング・アクチュエーションインタフェース, FIT2020 トップコンファレンスセッション, 2020/9/1
2. 鳴海紘也, マテリアル・インタラクション, はこだて未来大学学術講演会, 2020/7/20
3. 鳴海紘也, HCI におけるコンピューティショナルファブリケーション, 豊田中央研究所, 2021/11/10

受賞

1. **Best Paper Award Runner Up**, K. Narumi, H. Sato, K. Nakahara, Y. Seong, K. Morinaga, Y. Kakehi, R. Niiyama, and Y. Kawahara, “Liquid Pouch Motors: Printable Planar Actuators Driven by Liquid-to-gas Phase Change for Shape-changing Interfaces,” IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), 2020/6/30
2. **Best Demo Award**, R. Niiyama, H. Sato, K. Tsujimura, K. Narumi, Y. a. Seong, R. Yamamura, Y. Kakehi, and Y. Kawahara. 2020. poimo: Portable and Inflatable Mobility Devices Customizable for Personal Physical Characteristics. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST ' 20), 2020/7/23
3. **People's Choice Best Demo Honorable Mention Award**, Mako Miyatake, Koya Narumi, Yuji Sekiya, and Yoshihiro Kawahara. 2021. Flower Jelly Printer: Slit Injection Printing for Parametrically Designed Flower Jelly. Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 425, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1145/3411764.3445346>, 2021/5/14