

3D プリンターによる一体造形式回転機構の提案

新山 大翔* 沖 真帆* 塚田 浩二*

概要. 3D プリンターを活用したモノづくりの中で、複数の部品が組み合わさって動く立体物を一回でプリントする「一体造形手法」が用いられることがある。これは、組立作業が不要なため、「時間／手間のコストを抑えながら試作検証ができる」、「入れ子構造のような複雑な形状を制作できる」等のメリットがある。しかし、造形を成功させるためには、部品間の隙間を適切に設けたり、サポート材を除去しやすい形状や出力設定を模索したりと、設計／出力時に配慮すべき点が多い。この試行錯誤には手間と時間を要するため、初心者には難しい手法であった。そこで本研究では、3D プリンターを用いた一体造形に適する機構設計を試みる。本稿では、主に回転機構について、作成した例と実験について記述する。

1 背景

低価格なFDM(熱溶解積層)方式の3Dプリンターの普及によって、個人レベルでの3Dプリンターを活用したモノづくりが増加している。その中で、複数の部品が組み合わさって動く立体物を一回でプリントする、一体造形手法(Print in Place)が用いられることがある。一体造形手法を利用すれば、従来手法では制作が難しかった形状(例:入れ子構造)を容易に作れたり、複数パーツの連結形状(例:ヒンジ/チェーン)の組立作業が不要になるメリットがある。一方、造形を成功させるためには、部品間の隙間を適切に設けたり、サポート材を除去しやすい形状や出力設定を模索したりと、設計／出力時に配慮すべき点が多い。この試行錯誤には手間と時間を要し、初心者には難しかった。そこで本研究では、一般的なFDM方式の主流であるシングルヘッド方式の3Dプリンターでの一体造形手法に適した作動機構を設計する(図1)。さらに、多様な応用例への適用や、出力条件の調査を通して、提案機構の汎用性を検証する。

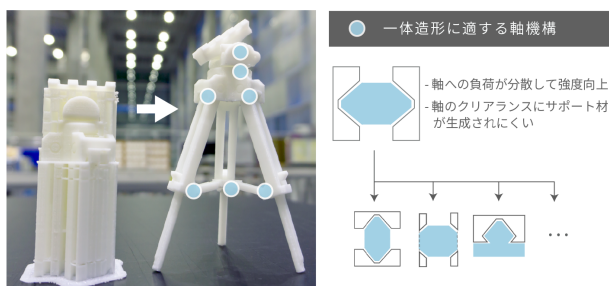


図 1. 円錐台形状を用いた一体造形式回転機構。

2 関連研究

FDM 式 3D プリンターを用いた関連研究事例を紹介し、本研究とのかかわりを述べる。

Ion らは、フレキシブル樹脂フィラメントで造形したセル構造を持つオブジェクトを変形させることにより、ドアのロック機構やスイッチなどの作動機構 [1] や、圧力をかけることで変形し造形物の表面の質感を変化させる機構 [2] を作成している。本研究では、FDM 方式の 3D プリンターにて標準で使われる ABS 樹脂素材を用いることで、より汎用的かつ組立不要な作動機構の作成に焦点を当てる。著者らは過去に 3D プリンターでの出力に適したジョイント機構を提案した [9][10]。その中にはネジ等の部品を必要とする機構や、制作者以外が組立することが難しい機構があった。一体造形手法を用いることで、一部のジョイント機構の造形が容易になると考える。

3D プリンターを G-code を介して直接的に制御する事により、新たな表現力を模索する研究が増えてきている。高橋らは、3D プリンターの造形パラメータを制御するソフトウェアを開発し、造形物の表面に任意の模様を描画したり、複雑な質感や毛構造等を造形する手法を構築した [4][8]。また、片倉らは、3D プリントしたオブジェクトをその 3D プリンタ上で作動させるための一体造形による作動機構を提案している [7]。本研究では、既存の 3D プリンターとソフトウェアを使用するモノづくりを対象として、組立不要な作動機構の作成に焦点を当てる。

FDM 式 3D プリンターで造形を行うと、サポートと呼ばれる補助パーツが生成される。これは造形物の形状を維持するために必要だが、除去に手間がかかるデメリットがある。少ないサポートで造形する手法 [5] や、ロボットアームで造形土台を動かすことでサポート無しで造形するシステム [3] が提案されている。Zhang ら [6] は、サポートを除去した際の残留物が造形物の美観を損ねる点に着目し、知

覚的に重要な領域（例：顔）にサポートが配置されない印刷方向を決める手法やアルゴリズムを構築した。本研究は作動機構の一体造形を実現するために、作動部の軸の強度を向上させつつ軸部に生成されるサポート量を減らす機構を試作する。

3 提案

本研究では、3D プリンターによる一体造形が可能な機構を設計し、それらを調整可能な仕組みを構築することで、ファブ時代の構造設計の効率化を目指す。まず、作動機構を題材に、一体造形の基本機構と課題について整理し、本研究のアプローチについて述べる。

3.1 一体造形の基本機構と課題

作動機構は基本的に、作動部と受動部で構成される（図2）。力が掛かっても分解しないよう片方に突起等が設けられ、作動方向以外の動きが制限される。機構を3D プリンターで造形すると、作動部と受動部の間に、造形物の形状を保持するためのサポート材が構築されるため、造形後はサポート材を除去する作業が必要である。一体造形の課題は大きく分けて三つある。一点目は、作動部と受動部の間に適切な隙間が必要な点である。これが大きすぎるとガタつきのある不安定な動きになり、小さすぎると動かしにくい／動かない等のトラブルが起こる。二点目は、サポート材除去の問題である。サポート材の量が多い／造形物への密着が強いと、除去作業が困難になる。具体的には、造形物の一部が欠損したり、除去しきれていないサポート材が動きの邪魔をして、滑らかに作動することができなくなる。三点目は、強度の問題である。サポート材の除去時や作動時にかかる負荷で、作動部が破損する恐れがある。そのため、強度を考慮した設計が必要となる。

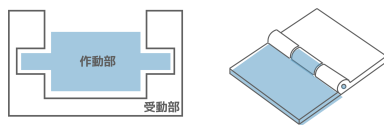


図2. 作動機構の模式図（左）と利用例（右）。

3.2 本研究のアプローチ

前述の課題への対策として、構築されるサポート材が少量かつ取り除きやすく、作動時の負荷を分散させるような機構を設計する方法が考えられる。そこで我々は、一体造形のための機構を複数制作し、その機構のサイズ／クリアランスを調整するシステムの設計を目指す。本稿ではまず、多くの作動機構に用いられる回転機構に着目して設計／実装を進める。

4 実装

ここでは、3D プリンターによる一体造形のための汎用的な回転機構とその応用例の実装について述べる。

4.1 基本の回転機構の設計と検証

市販品に多い一般的な回転機構（例：ヒンジ等）は図3左のような円柱状の軸であり、本来は金属等の強度の高い素材が使用される。しかし、3D プリンターで作る場合は強度の高い素材を使用できないため、軸が破損しやすい。そこで、軸の最も破損しやすい部分である根本の負荷を分散させるために、図3右のような円錐台形状にした。この形状は、サポート材の生成を回避する利点もある。3D プリンターの印刷設定ではサポート角度を指定でき、指定した角度まではサポートを付けずに造形できる。そのため、本機構の円錐台の角度（例：45度）よりも小さい角度（例：30度）にサポート角度を設定すれば、軸と軸受けの隙間にはサポート材が生成されないため、出力直後に作動させる際、軸への負担が少なくなる。

また、円柱形状と比較して、軸のガタツキが少ない、頂点部における軸受けとの接触面積が小さいため、少ない力で軸受けとの溶着部を剥離させられる利点がある。

我々は今回、FDM方式の「UP!Plus2」とABS樹脂フィラメントを使用して、作動可能な回転機構の一体造形が成功することを確認した。円錐台の底角は45度、作動部（回転軸）と受動部（軸受け）のクリアランスは0.2mmとし、主に軸受けを拡大することによってクリアランスを設けた。

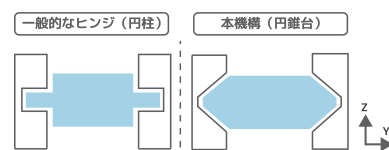


図3. 回転機構の比較。左：一般的な回転機構の軸形状、右：本機構の軸形状。

さらに、(1) 機構を90度回転した場合、(2) 円錐台の両端を切断した場合、(3) 2つの円錐台の底面を貼り合わせた形状の場合でも、一体造形後に作動することを確認している（図4）。

4.2 応用例

設計した回転機構を用いた応用例を3つ紹介する。

4.2.1 キャタピラベルト

スマートフォン等の側面を囲むようにして保持するための、無端環状のキャタピラベルトを作成した（図5）。一体造形する利点は、同一部品を一つ一つ

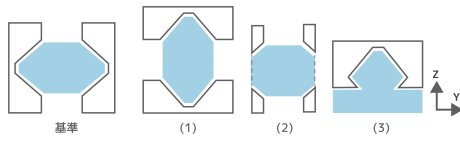


図 4. 回転機構の応用. (1) 機構を 90 度回転, (2) 円錐台の両端を切断, (3) 2 つの円錐台の底面を貼り合わせた形状.

繋げていく組み立ての手間／時間を削減する点、折りたたんだ状態で印刷が可能のため狭い造形範囲で出力できる点である (図 5 左). 基本パーツは軸部と軸受け部を持ち (図 5 中央), 同パーツを複数個連結して帯状に連ねて構成されている. 動作としては, 力を加えると各軸が回転しベルトの形状が変形するため, スマートフォン等の側面に沿わせた後, 専用のストッパーで長さを調節し締め付けるように固定する (図 5 右). ベルトの内側にある凹みにスマートフォンの側面がはまることで, ベルトから外れにくい仕組みとなっている. 図 6 にキャタピラベルトの利用例を示す.

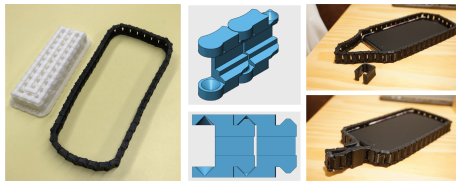


図 5. キャタピラベルト. 左: サポート材除去前 (白) と除去後 (黒), 中央: 部品 2 個の連結例 (下は側面図), 右: スマートフォンの固定例.

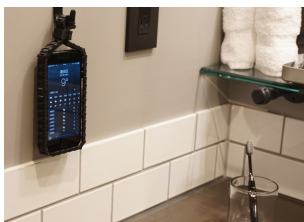


図 6. キャタピラベルトの利用例. ストッパーで生まれた輪を使って, フック等に吊るすことができる.

4.2.2 サーボスライド

歯車を使ってサーボモーターの回転を直線運動に変換させるジョイントを作成した. 図 7 の左に造形直後の写真を, 中央にサポート材除去後の写真を, 右にサーボを取り付けた写真を示す. 軸部が受動部, 軸受け部 (歯車) が作動部となっており (図 8), これは 4.1 より, (3) の形状を踏襲したものである. 歯車を用いた機構は軸のガタツキや歯のかみ合い具合

で作動に影響が出やすいが, 本機構で設計し造形したジョイントを数十回程度作動させた際, 前述の問題が起こらず滑らかに動くことを確認した. なお, 歯車とスライダは一体造形できるが, サーボモーターの取り付けには, 別途出力した歯車をネジで取り付ける必要がある. 動作を図 7 右に示す. サーボモーターと連結された黒い歯車が回転すると, 複数の歯車が連動して動き, 最後にラックギアを備えたスライダが平面移動を行う. 歯車は, スライダの平行移動の可動幅の増大を狙って複数個配置した.



図 7. サーボスライド. 左: サポート材除去前, 中央: サポート材除去後, 右: サーボの回転方向とスライダの移動方向.

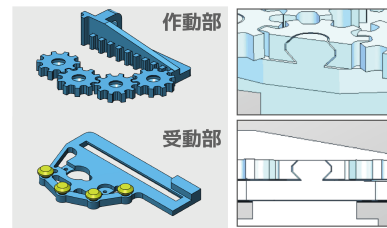


図 8. サーボスライドの構成 (左) と歯車の断面図 (右).

4.2.3 プチ三脚

角度調整機能を備える小型の折り畳み式三脚を試作した. 図 9 の左に造形後の写真を, 中央と右に 3D モデルを示す. 最上部に短いベースレールを備えており, レールに取り付けたアタッチメントの角度を 2 軸方向に調節することができる. これは, レールの根本にある回転機構により傾きを約 90 度の範囲で変更でき, レール部と三脚部の接合部分の回転機構により, 360 度水平方向に回転させることができる. 三脚部は, 脚の開閉と伸縮を行うことができる. 脚の連結部は, 各接続部にある回転機構によって滑らかに開閉する. 脚の伸縮については, 試作段階のスライド機構を使い, 脚の長さを最大 2 倍に伸ばすことができる. こういった構成要素が多く複雑なモデルを複数のパーツに分けて出力し組み立てる場合は手間／時間が掛かるが, 一体造形することでそれらのコストを削減できる.

5 出力実験

5.1 目的

FDM 方式の 3D プリンターは, 価格帯が幅広く, 完成品から組み立てキットまで様々な形態で販売さ



図 9. プチ三脚. 左: サポート除去前／除去後の外観, 中央: モデル外観, 右: 主要部品と回転機構

れている。また、使用する材料や、調整するパラメータも様々である。また、パラメータは、使用素材に合わせたり、造形時間の短縮を重視するなど、個人がそれぞれの目的に合わせた最適な設定で環境を構築しており、造形品質は環境によって異なる。今回の一体造形を用いる回転機構では軸と軸受けのクリアランスが重要であり、造形品質によっては、回転機構が作動しない状況が生じると考えられる。そのため、個々の環境に応じたクリアランスを把握するための基準モデルが必要であると考え、簡易的な基準モデルを設計した。本章では、基準モデルを用いた出力実験について述べる。5.2 節で実験の準備を、5.3 節で機種別クリアランス調査を、5.4 節で積層ピッチの影響調査を報告する。

5.2 準備

5.2.1 基準モデル

図 10 に示した基準モデルについて、これは、キャタピラベルトを踏襲した形状である、軸直径を 6mm とし、それぞれ 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm, 0.5mm のクリアランスを設けた軸受けを持つ構造体である。これを 3D プリンターで出力し、軸部以外のサポート材やラフトを除去した後、軸部を手でほぐして作動させることで、クリアランス毎に溶着の発生やガタつきの有無を直感的に調査することができる。たとえば 0.1mm の節が動かず 0.2~0.5mm が作動する場合は、0.1mm の軸は溶着が発生し、0.2mm 以上が利用可能なクリアランス値となる。作動した節と作動しなかった節を切断した写真を図 11 に示す。作動しなかった方(図 11 右)では、クリアランスが無くなり、軸と軸受けが一体化していることがわかる。この状態を本稿では完全溶着と呼ぶ。

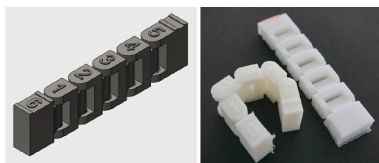


図 10. 調査に用いた基準モデル。

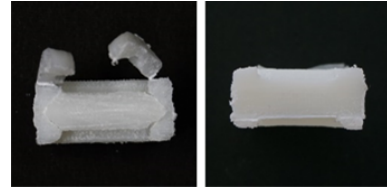


図 11. 出力した軸の断面。左から、作動可能な状態、完全溶着した状態。

5.2.2 利用機材と素材

調査で使用する 3D プリンターは、著者らが所有する 4 種類の FDM 式 3D プリンターを用いた(図 12)。素材は UP!Plus2 の ABS + フィラメントに統一した。

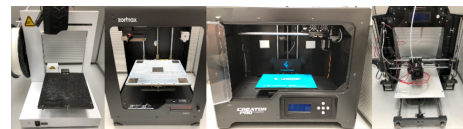


図 12. 調査に用いた 3D プリンター。左から、UP!Plus2, Zortrax M200, FlashForge Creator PRO, HICTOP Prusa i3.

5.3 実験 1：機種別のクリアランス調査

5.3.1 手法

図 10 に示した基準モデルを図 12 に示す 4 種類の 3D プリンターで出力し、作動する節とその節の固さを調査する。各機材の出力設定は、ABS 素材でのソフトウェア標準の設定に準拠するものである。設定したパラメータを表 1 に示す。本実験では、積層ピッチは 0.2mm(Zortrax は 0.19mm) に統一した。

5.3.2 結果と考察

結果を表 2 に示す。作動しない、あるいは手でほぐす際に破損するような状態の節は「不可」、手で節をほぐした後、軽く揺すっただけでも軸が可動する状態の場合は「緩い」、手で節をほぐした後も、手で力をかけることで作動する状態を「固い」として、3 段階に分類した。著者の出力環境では、クリアランスが 0.1~0.2mm 間では可動しない節をもつ 3D プリンターがあり、0.3~0.5mm 間では軸のクリアランスが「固い」ものと「緩い」物が混在していた。また、Creator PRO では、クリアランスが 0.5mm の節で下軸部が出力中に軸受け部から脱落してしまい、軸が消失した状態になった。過剰にクリアランスを設けた場合でも作動不可となってしまう場合があることが判明した。得られた結果より、機種毎の差を調査することができたので、これを基準クリアランスとして、可動部の硬さを調整できる見通しが

表 1. 設定したパラメータ. ソフトウェア上で設定項目がない場合は「-」を記載した.

	UP Plus2	Zortrax	Creator PRO	Prusa i3
印刷速度	-	-	60mm/s	50mm/s
品質	ファイン ¹	HIGH ²	-	-
サポート角度	10 度以下	10 度以下	30 度以下	30 度以下
出力温度	-	-	220 度	240 度
内部密度	semi-solid ³	High ⁴	15 %	20 %

つuitと考えらるる. これをもとにして, クリアランスを調整するシステムを構築したい.

表 2. 積層ピッチ 0.2mm の出力結果. 各軸部の状態を不可／固い／緩いの 3 段階で示す.

積層0.2mm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
UP Plus2	固い	緩い	緩い	緩い	緩い
Zortrax M200	不可	固い	固い	固い	緩い
CreatorPRO	不可	不可	固い	固い	不可*
Prusa i3	不可	不可	固い	固い	固い

*下部の軸が脱落

表 3. 積層ピッチ 0.3mm の出力結果.

積層0.3mm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
UP Plus2	固い	固い	緩い	緩い	緩い
Zortrax M200	不可	不可	固い	不可	固い
CreatorPRO	不可	固い	固い	固い	固い
Prusa i3	不可	不可	固い	固い	固い

表 4. 積層ピッチ 0.4mm の出力結果.

積層0.4mm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
UP Plus2	不可	固い	固い	固い	固い
Zortrax M200	不可	不可	不可	不可	不可
CreatorPRO	不可	不可	不可	固い	固い
Prusa i3	不可	不可	不可	固い	固い

5.4 実験 2 : 積層ピッチ変更によるクリアランスへの影響調査

積層ピッチは, 造形時の 1 層の厚みを決める印刷設定であり, 造形時間と品質に関係している. 値を小さくすれば造形時間が長くなるが造形物の表面が滑らかになり, 値を大きくすれば造形物の表面が粗くなるが, 造形時間が短縮される. よって, モデルの出力は精度に影響がない範囲で荒い設定とすることが望ましい. そこで, 本回転機構における積層ピッチの変化による影響を調査した.

5.4.1 手法

表 1 に示したパラメータに準拠する形で, 積層ピッチのみをそれぞれ 0.3mm(Zortrax は 0.29mm), 0.4mm(Zortrax は 0.39mm) に変更して, 4 種類の 3D プリンターで基準モデルを出力した.

5.4.2 結果と考察

積層ピッチ 0.3mm における各機種のカリアランスの状態の調査結果を表 3 に, 積層ピッチ 0.4mm における各機種のカリアランスの状態の調査結果を表 4 に示す.

積層ピッチが大きくなるほど可動する節が減少する傾向はすべての機種にみられた. 得られた結果より, 積層ピッチが 0.2~0.3mm の間では, クリアランスへの影響は少ないと考えられる. また, 0.4mm の積層ピッチでは, 不可となる節が大きく増加して

いることから, 一体造形式の回転機構では, 機種に依らず, 積層ピッチを 0.3mm 以下で出力する必要がある可能性が示唆された. 今後は, 機種によってクリアランスへの影響が増減する要因となるものを調査したい.

6 議論

ここでは, 「基準モデル」の活用方法と, 実装と性能検証の結果を踏まえて, 「作動部の固さ」「一体造形に適した設計」「回転以外の機構設計」について議論する.

6.1 基準モデルの使い方

図 10 で紹介した, 基準モデルについて, 個人環境における使い方を述べる. まず, 個人の 3D プリンターで基準モデルを出力し, 適正クリアランスを確認する. この適正クリアランスに応じて, 出力するモデルの回転機構のカリアランスを調整する. この手順で一体造形式の回転機構を持つモデルを作成することで, 少ないコストで様々な個人環境に適応できると考える. 今後は, 実際にモデルデータを公開し, 出力結果のフィードバックを集めることで出力が成功するかを検証していきたい.

6.2 作動部の固さ

5 章の実験では, 作動部の状態を作動不可／固い／緩いという 3 段階で分類したが, 「固い」には, 軽く動かすだけで動くものや, しっかりと手ごたえを感じる固さも含まれており, 幅広い固さを内包した分類となっている. この固さの違いを, 様々な機

¹ ファイン, ノーマル, ファストの三段階

² HIGH, NORMAL, DRAFT の三段階

³ Solid, semi-solid, semi-hollow, hollow の四段階

⁴ MAXIMUM, HIGH, MEDIUM, LOW の四段階

種で意図して再現できるような調整ができれば、角度を変えられるスタンドなど、モデリングによる表現の幅が広がると考えられる。これは、基準モデルを出力し固さを確認した後、その結果に応じてクリアランスを設定する方法で、実現できる可能性があると考えている。

6.3 一体造形に適した設計

円錐台形状の軸と軸受けはサポート材を使わずに造形できるが、それ以外の部分にはサポート材が生成されてしまう。ここでは、サーボスライドを例にその状況と対策を説明する。サーボスライドは、歯車（軸受け）とスライダを備えた作動部と、歯車の回転軸とスライド穴を備えた受動部に分けられる（図8左）。歯車と受動部の間にはサポート材が生成され、この狭い隙間にできたサポート材は除去が非常に難しい。今回はこの対策として、受動部に複数の穴を設けることで裏からサポート材を取り外せるように工夫した（図13）。こういったサポート材除去のためのノウハウを汎用的な手法に落とし込めるように、試作の知見を整理したい。

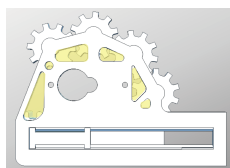


図 13. サーボスライド裏面図。サポート材除去を助ける穴（黄色い領域）を設けた。

また、新たな課題として、出力パラメータの設定によっては、軸受けやその周辺部分が破損することがあった。今後は軸受け側の負荷も考慮し、より実用的な形状に改良したい。

6.4 回転以外の機構設計

本稿では回転機構に焦点を当てて実装・検証したが、異なる作動機構についても一体造形に適した機構設計を進めたいと考えている。現時点ではスライド機構の試作を進めており、4.2.3で紹介した三脚の脚の伸縮部に組み込み、出力／作動に成功する事を確認している。ただし、このスライド機構は出力方向に制約があり、また、必要となるクリアランスが回転機構と異なる可能性がある。

7 まとめと今後の課題

3D プリンターを用いた一体造形に適する機構設計を目指し、回転機構とその応用例を実装した。今後は、試作で得た知見を整理しながら、スライド機構の設計や、サイズやクリアランスを調整するシステムの構築を進める。

参考文献

- [1] Alexandra Ion, Johannes Frohnhofen, Ludwig Wall, Robert Kovacs, Mirela Alistar, Jack Lindsay, Pedro Lopes, Hsiang-Ting Chen, and Patrick Baudisch. Metamaterial Mechanisms. In Proceedings of UIST '16, pp.529-539. 2016.
- [2] Alexandra Ion, Robert Kovacs, Oliver S. Schneider, Pedro Lopes, and Patrick Baudisch. Metamaterial Textures. In Proceedings of CHI '18. Paper 336, 12 pages, 2018.
- [3] Chengkai Dai, Charlie C. L. Wang, Chenming Wu, Sylvain Lefebvre, Guoxin Fang, YoungJin Liu. 2018. Support-Free Volume Printing by Multi-Axis Motion. ACM Trans. Graph. 37, 4, Article 1, 13 pages, 2018.
- [4] Haruki Takahashi and Homei Miyashita. Expressive Fused Deposition Modeling by Controlling Extruder Height and Extrusion Amount. In Proceedings of CHI 2017, pp.5065-5074, 2017.
- [5] Vanek, Juraj, Jorge A. Garcia Galicia, and Bedrich Benes. Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication. Computer graphics forum. Vol. 33. No. 5. 2014.
- [6] Xiaoting Zhang, Xinyi Le, Athina Panotopoulou, Emily Whiting, and Charlie C. L. Wang. Perceptual models of preference in 3D printing direction. ACM Trans. Graph. 34, 6, Article 215, 12 pages. 2015.
- [7] 片倉翔平, 渡邊恵太. PrintMotion: 3D プリンタに搭載されたアクチュエータを使用してプリントしたオブジェクトを動かす手法の提案, WISS2018 論文集 (2018)
- [8] 高橋治輝, 宮下芳明. 熱溶解積層方式 3D プリンタを用いた表現と造形手法のデザインのためのパラメータ探索手法, インタラクシオン 2018 論文集, pp.135-144, 2018.
- [9] 新山 大翔, 沖 真帆, 塚田 浩二, 3D プリンターの特性に配慮した汎用ジョイント機構の提案, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2016 論文集, pp.252-258, Nov, 2016.
- [10] 新山 大翔, 沖 真帆, 塚田 浩二, 3D プリンタを用いた弾力調整可能なコイルスプリングジョイント機構の試作と評価, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクシオン (HCI), 2019-HCI-182(33), pp.1-8, 2019.