

3D プリンターにおける組立不要な一体造形手法の提案

新山 大翔^{†1} 沖 真帆^{†1} 塚田 浩二^{†1}

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、試作した回転機構と作例を紹介する。

1. 背景

低価格な 3D プリンターの普及によって、個人における 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。たとえば、従来手法では制作が難しかった形状 (例：入れ子構造) でも、一体造形により容易に作るができる。また、ヒンジやチェーンのような構造を一体造形することで、組立作業が不要になり、時間／手間のコストを抑えながら試作検証ができるメリットがある。一方、造形を成功させるためには、部品間の隙間 (以下、クリアランス) 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、3D プリンターを用いた一体造形手法に適する機構設計に着目した。我々はまず、作動部によく用いられる回転機構を対象として、一体造形に適した機構を試作した。本稿ではその試作と応用例を紹介する。

2. 関連研究

Koyama ら[1] は、固定する物体とその物体の固定先の 3D モデルを入力することで、それらを繋ぐジョイントを生成するシステムを提案した。Metamaterial Mechanisms [2] 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用される ABS 樹脂素材を用いて、組立不要な作動機構の作成に焦点を当てる。

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 1)。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、作動部と受動部のクリアランスに、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。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二つある。ひとつ目は、作動部と受動部の間に適切なクリアランスが必要な点である。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。ふたつ目は、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、除去しきれっ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。

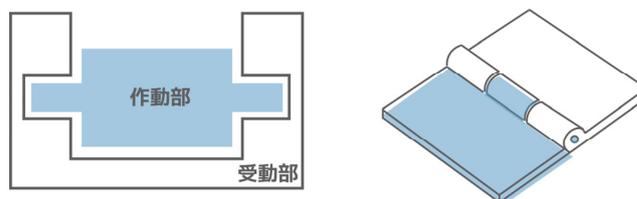


図 1 作動機構の模式図 (左) と利用例 (右)。

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いような機構を設計する方法が考えられる。そしてその機構のクリアランスを、後から調整可能

^{†1} 公立はこだて未来大学

にすることで、試行錯誤の手間／時間を軽減できると考えた。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。まずは、多くの作動機構に用いられる回転機構に着目し、汎用的な回転機構の一体造形から着手する。

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および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2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2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、サポート材が生成されずに造形することができる。

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、軸回りにサポート材が生成されずに本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。

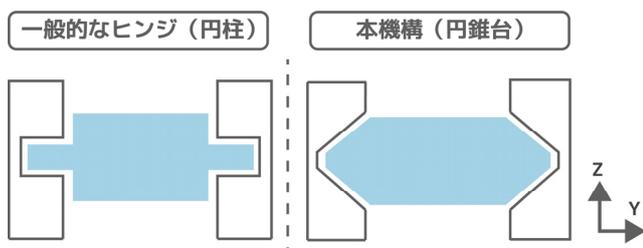


図2 回転機構の比較。左：一般的な回転機構の軸形状、右：本機構の軸形状。

4.2 回転機構を用いた事例

設計した回転機構を使い、3つの応用例を試作した。

4.2.1 レール用レバー式ジョイント

ピカティニーレールの規格を元にモデリングした、ベースレールに着脱するレバー式ジョイントを作成した（図3）。レバーを下げることによって、レールの任意の位置に取り付けることができる。一体造形の利点は、一定の強度を保ちつつネジ不要で作成できることである。動作としては、レバーを押し下げて（図3のA）ロックすると（B）、下部の2つの軸が押し下られ回転する（B、D）。その動きに連動して突起がレールを挟むように締めつけて固定する（C、E）。



図3 レバー式ジョイント。左：取り付け例、中央：構成パーツ（ベースレールとレバー）、右：動作の模式図。

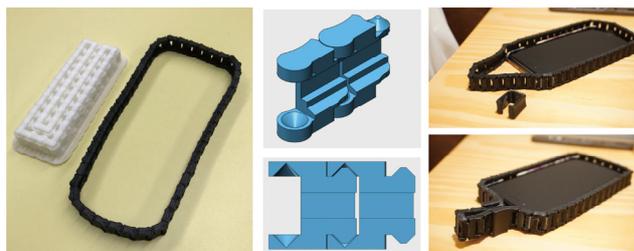


図4 キャタピラベルト。左：サポート材除去前（白）と除去後（黒）、中央：部品2個の連結例（下は側面図）、右：ストッパーを用いたスマートフォンの固定例。

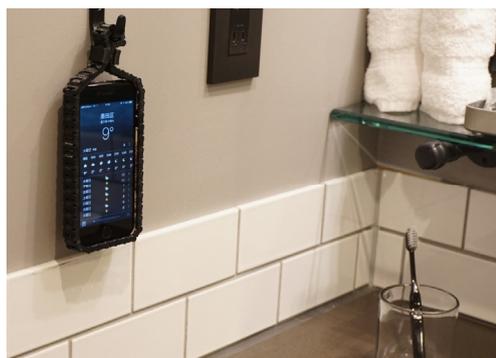


図5 キャタピラベルトの利用例。ストッパーの取り付けで生まれた輪を使って、フック等に吊るすことができる。

4.2.2 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4）。一体造形する利点は、同一部品を一つ一つ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4左）。基本パーツは軸部と軸受け部を持ち（図4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4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5にキャタピラベルトの利用例を示す。

4.2.3 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6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。歯車の作動に図2右の機構を使用しているが、ここでは軸部が受動部、軸受け部（歯車）が作動部となっている（図7）。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が安定して作動することを確認した。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6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、最後に連結された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を増大させることを狙って複数個使用した。



図6 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。

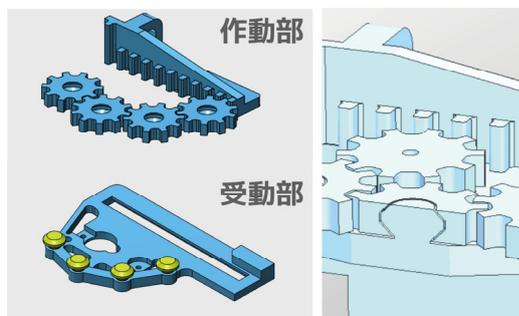


図7 サーボスライドの構成(左)と歯車部の断面図(右)。

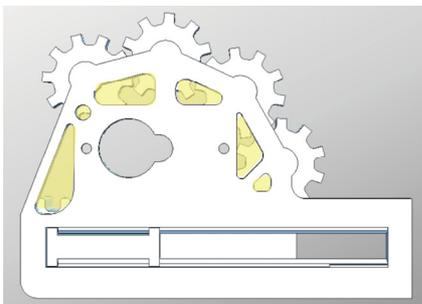


図8 サーボスライド裏面図。サーボスライドに設けたサポート材除去を助ける穴（黄色い領域）を設けた。

5. 議論

4.1 で述べたように、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7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8）。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。

6. 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、直線運動のための汎用機構の設計や、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] Yuki Koyama, Shinjiro Sueda, Emma Steinhardt, Takeo Igarashi, Ariel Shamir, and Wojciech Matusik. AutoConnect: computational design of 3D-printable connectors. *ACM Trans. Graph.* 34, 6, Article 231, 2015.
- [2] 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.