

# DynaPin: 3Dプリンタのヘッドによる自動引き出し ピンアレイを用いた動的なサポート構築

一井 駿<sup>1,a)</sup> 渡邊 恵太<sup>1</sup>

**概要:** 熱溶解積層法 3D プリンティングにおけるサポート材は、材料廃棄に伴うコストの増大や、造形時間が長くなるという課題がある。これに対し、従来の 3 軸 FDM 3D プリンタよりも複雑な機構の導入や、ユーザの介入による解決策が提案されている。しかし、既存の 3D プリンタへの導入の難しさやユーザの負担といった問題を抱えている。そこで本研究では、ヘッドが外部オブジェクトを用いて支持構造 (カンチレバー) を能動的に構築する, DynaPin を提案する。本手法では、ユーザが事前に土台をベッドに固定し、ピンを配置する。造形時には、ヘッドがピンを直接引き出して支持構造を形成し、その上に積層を行う。一般的な開放型の 3D プリンタに専用装置を追加する形で容易に導入できる点が特徴である。ピンアレイを用いた造形により、材料と造形時間を削減し、造形プロセスの効率化と自動化を両立できる。さらに、造形前の準備によって、ユーザによる造形物への物体挿入という応用可能性が示唆された。

## 1. はじめに

3D プリンタは、産業分野だけでなく一般消費者の間でも広く普及している。その利便性と手軽さから、ユーザは 3D プリンタを利用して様々な製品やプロトタイプを作成できる。特に、熱溶解積層 (FDM) 方式の 3D プリンタはその扱い、手入れのしやすさから広く使われており、オーバーハングに対してはサポート材を用いることで造形を行う。しかし、オーバーハングの位置が高い場合や多く存在する場合、サポート材によりフィラメント使用量や造形時間が増加するという課題がある。

この課題に対して、これまで 3D プリンタへの複雑な機構の導入やユーザの介入を伴う解決策がある。1 つは、多軸機構や可動式ベッドを備えた 3D プリンタを用いる手法である [1, 7]。これらの手法は、サポート材の量を大幅に削減できるが、多軸運動や専用のベッドの制御が複雑なため、既存の安価な 3 軸プリンタへの適用は困難である。もう 1 つは、造形プロセス中にユーザが手動で外部物体を挿入し、サポート材やインフィルの代替にする手法である [8, 5, 4, 6]。これは既存プリンタで実現可能だが、造形中にユーザが介入する必要があり、全自動化できないという欠点がある。

そこで本研究では、既存の 3 軸 FDM 3D プリンタに動力を持たないピンアレイを追加することで、ヘッドによる

サポート構築を行う, DynaPin を提案する。本手法の特徴は、3D プリンタのヘッドの移動機能を、ピンの制御を行うマニピュレータとして転用する点である。これにより、専用機材やユーザの介入なしにサポート材の使用量や造形時間を削減することを目指す。図 1 に提案手法の概要を示す。

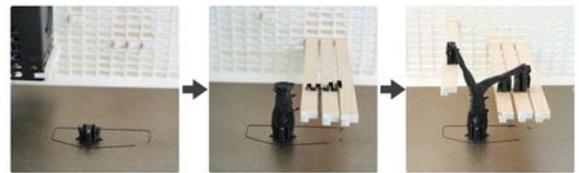


図 1 提案手法の概要。ヘッドを用いてピンアレイを制御することにより支持構造を構築し、その上に造形を行う。

## 2. 関連研究

### 2.1 ハードウェアによるフィラメント使用量の削減

サポート材の削減や再利用によるフィラメント使用量と造形時間の削減を目的として、3D プリンタのハードウェア機構そのものを拡張、変更する手法が提案されている。

Grutle は、3 軸 FDM 3D プリンタに 2 つの回転軸を追加した Pentarod という 5 軸 FDM 3D プリンタを開発し、造形物を回転させることでサポート材におけるフィラメント使用量を削減できることを示した [1]。しかし、この手法はテーブル (ベッド) を回転させるためにハードウェアの変更を必要とし、スライサも 5 軸に対応したものが必要と

<sup>1</sup> 明治大学 総合数理学部 先端メディアサイエンス学科

<sup>a)</sup> ev230534@meiji.ac.jp

なる。

また、ベッド自体を可動式にすることで、動的にサポートを提供する手法もある。Xuらは、再利用可能なサポートとして用いる手法を提案している [7]。この手法では、多数のピン（ピンアレイ）が昇降するベッドを用い、造形形状に合わせてピンを隆起させている。これにより、サポート材の使用量は削減できるが、ピンアレイを動かすためのモータが追加が必要となる。実際に、Xuらは再利用可能なサポート材を他の積層造形プロセスに適用する方法は未解決だと述べている。

## 2.2 ユーザ介入による動的な支持構造構築

専用のハードウェアを用いず、通常の 3D プリンタとユーザの介入を組み合わせた手法がある。高橋らは、造形工程の観察やユーザの介入を前提とした、安定した一時停止命令のための設計要件を論じている [8]。また、Wallらはユーザが手作業で再利用可能な物体をサポート材やインフィルの代替として挿入する Scrappy, Substiports というシステムを提案している [4, 5, 6]。Scrappy では、廃棄物などをインフィルとして内部に埋め込むことで材料を節約する。Substiports では、本やブロック状の玩具、スクリュージャッキなどの再利用可能な物体を、造形プロセスの一時停止時にユーザが挿入し、これをサポート材として利用する。この手法は、スライサの変更のみで実現でき、ハードウェアの改造が不要である。また、物体を再利用するため造形時間と材料コストを削減できる。しかし、これらの手法では造形時間の途中でユーザの介入が必須であり、造形プロセスにおけるユーザへの依存度が高いという課題がある。

## 2.3 既存機構の転用による機能拡張

片倉らは、FDM 3D プリンタのヘッドを 3 軸のロボットマニピュレータとして積層造形以外に用いる手法を提案している [2, 3]。3D プリンタのヘッドに装着、脱着可能なエンドエフェクタを用いて、サポート材の破壊、除去や造形物の組み立て、物理操作を造形プロセスに統合した。これらの研究は、標準的な 3 軸構成の 3D プリンタを用いて、ユーザの介入を伴わない組立や制御を実現している。

## 2.4 本研究の位置づけ

これら既存研究は、ハードウェアの改良、ユーザ介入によるサポート材の量を低減する手法と、ヘッドをマニピュレータとして造形以外に転用する手法に大別される。本研究は、既存のオープンな FDM 3D プリンタへの外付けによって、能動的に支持構造を構築するヘッド駆動型のサポート構築を提案する点で、既往手法と明確に異なる。ユーザによる介入を低減し、3D プリンタのヘッド機能を

応用することでサポート材におけるフィラメント使用量や造形時間の削減を目指す。

## 3. 提案システム

本研究で提案する DynaPin では、既存の FDM 3D プリンタにアタッチされたオブジェクトを造形時にヘッドを用いて制御する。システムの主要な構成要素として、3D プリンタ本体、ヘッド駆動型サポート機構、および G-code を生成、編集するソフトウェア環境がある。

### 3.1 ハードウェア構成

3D プリンタには Kingroon KP3S<sup>\*1</sup>を使用した。これは開放型の熱溶解積層方式 Bed Slinger 3D プリンタであり、0.4mm ノズルを備えている。Bed Slinger とは、Y 軸方向に動くベッドを備えた 3D プリンタの 1 種である。

提案手法を実現するための動的サポート機構は、ピンアレイを保持する土台とかぎ状の先端部分を備えたピン、ヘッド側に取り付けるアタッチメントから構成される。土台、ピンの先端部分、ヘッド側のアタッチメントは Blender<sup>\*2</sup>を用いてモデリングし、Bambu Lab X1-Carbon<sup>\*3</sup>を用いて造形した。アタッチメントを造形する際には、Bambu PLA Matte アイボリーホワイトを使用した。ピンの先端部分以外については、フィラメントのような熱可塑性を持たない木製の端材を使用した。ハードウェア構成は図 2 に示す。

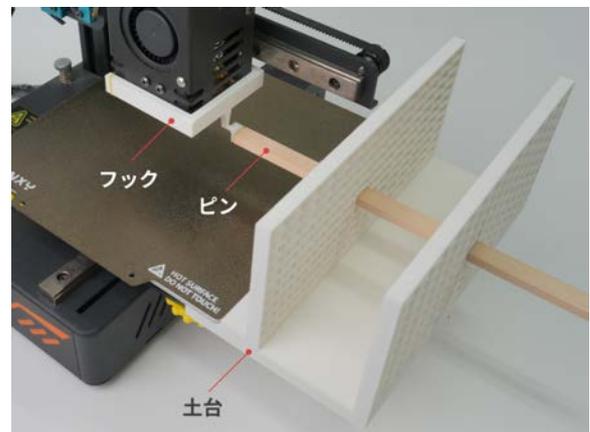


図 2 ハードウェア構成。ベッドに固定されたピンアレイを保持する土台と、土台に配置するかぎ状の支持ピン、ヘッド側に取り付けるフックで構成する。

- (1) ピンアレイを保持する土台: 2つの格子によってピンを支える役割をしている。プリンタの造形ベッドに固定して、造形時に Y 軸方向に動くベッドと同期して動作する。この際、ベッドの動きがピンに影響しないように、格子をピンに通した際に X 軸と平行となるよう

\*1 <https://www.kingroon.com/>

\*2 <https://www.blender.org/>

\*3 <https://bambulab.com/>

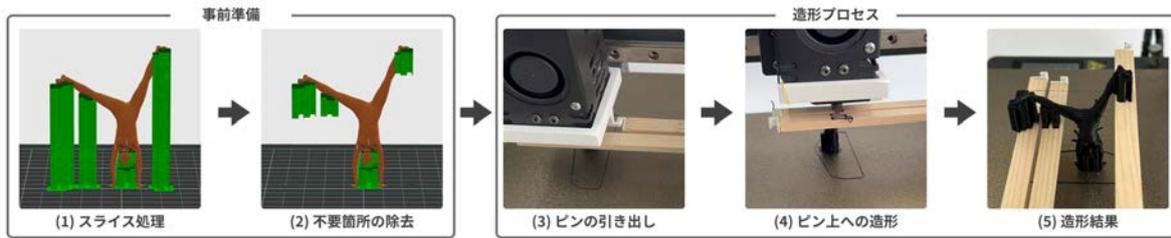


図3 本手法のワークフロー。(1) スライス処理, (2) Python, 手作業による G-code の編集, (3) ヘッドの移動によるピンの引き出し, (4) 引き出したピンへの造形。(5) 造形結果

に配置した。また、Kingroon KP3S はシングル Z 軸であるため、干渉しないように土台はベッドを挟んで反対側に配置している。

- (2) かぎ状の支持ピン: ピンは土台に支えられ、ヘッドの制御によって造形物を支持する。使用した木材は、長さ約 22.5cm、幅 1cm、厚さ 0.5cm である。3D プリンタを用いて作成した先端部分はかぎ状となっており、ヘッド側のアタッチメントと接続できる。
- (3) ヘッド側アタッチメント: このアタッチメントはヘッドに装着され、支持ピン先端のかぎ状部分を接続・制御するために使用するものであり、ヘッドに固定する部分とピンとの接続部分を備えている。ピンとの接続部分はノズルの座標を基準として Z 軸方向に数 mm 程度高く、Y 軸方向にはノズルと近い位置に配置した。

### 3.2 G-code の準備

造形時に 3D プリンタを制御するために用いる G-code の生成と調整には、Orca Slicer<sup>\*4</sup>と、G-code を編集するために実装した Python スクリプトを用いた。具体的な制御フローとして、以下の手順で G-code を用意した。

- (1) 用意した 3D モデルに対し、Orca Slicer でスライス処理を行い、G-code を生成する。
- (2) 上記で生成された G-code を Python スクリプトで編集し、造形に不要なサポート材の部分を削除する。
- (3) Python スクリプトで修正された G-code に、手作業でヘッドが支持ピンを引き出す動作を行う G-code を挿入し、Python スクリプトで削除しきれなかった G-code を修正する。

これらの仕組みにより、本システムは人が介入することなく、ヘッドが能動的に支えとなるピンを引き出すことで、サポート材に必要なフィラメント使用量を抑えて造形できる。本手法のワークフローを図 3 に示す。

## 4. 実験

本節では、提案手法 (DynaPin) が標準の手法と比較してサポート材のフィラメント使用量を削減し、造形時間を低減できるかを検証する。

### 4.1 評価モデル

評価には Female Gymnastics - Cartwheel<sup>\*5</sup>を使用した。以下 Gymnast とする。このモデルは Substiports や可動式ベッドを用いた手法の評価に用いられており、頭部や脚部に大きなオーバーハングを持つため、本手法の効果を評価しやすい形状である [5, 7]。

### 4.2 実験環境

実験には以下の環境を使用した。3D プリンタは Kingroon KP3S、フィラメントは Bambu PLA Matte チャコールを用いた。また、スライサは Orca Slicer を用いた。

### 4.3 実験条件

以下の 2 条件で造形を行い、フィラメント使用量と造形時間を比較した。

- (1) 従来手法: Orca Slicer にて、Bambu PLA Matte @System, 0.30mm Standard @Kingroon KP3S 3.0 のプリセットを使用して生成した G-code による造形を行う。通常サポートを指定し、ノズル温度は 220 °C、ベッド温度は 55 °C、サポート材の造形速度は 70mm/s に設定した。
- (2) 提案手法: 条件 1 で生成した G-code を Python スクリプトおよび手動で修正し、本手法に対応した G-code による造形を行う。

### 4.4 評価指標

本実験では、評価指標としてサポート材のフィラメント使用量、全体のフィラメント使用量、経過時間、および表面品質を用いた。フィラメントの使用量と経過時間はスライサで G-code を読み込むことで算出する。サポート材のフィラメント使用量は、サポートとサポート接触面における使用量を合計して用いる。また、サポート材の造形にかかった時間も同様にサポートとサポート接触面における時間を合計して用いる。表面品質は目視による評価を行った。

### 4.5 結果

本研究では、ヘッド主導型の動的な支持構造を用いた提

<sup>\*4</sup> <https://orca-slicer.com/>

<sup>\*5</sup> <https://www.thingiverse.com/thing:2655328>

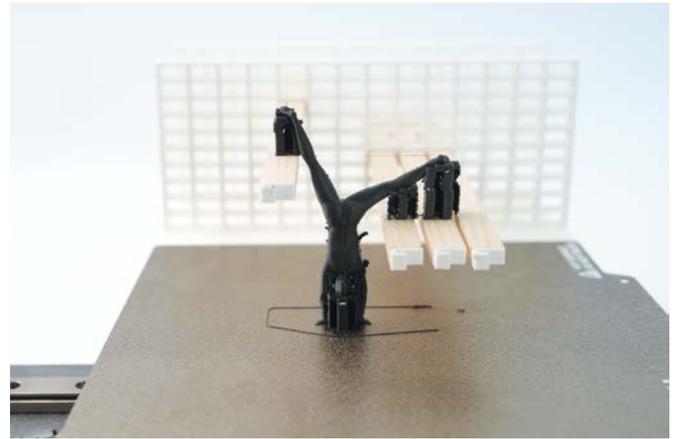
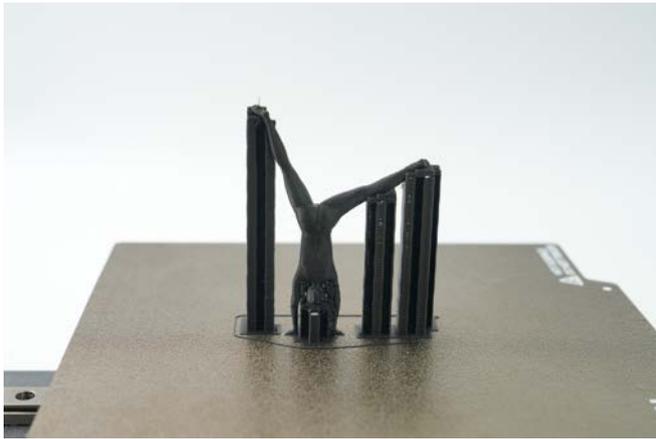


図 4 Gymnast モデルの造形結果. 左: 従来手法による造形, 右: 提案手法による造形

案手法によるフィラメント使用量, 経過時間を検証した.

サポート材および全体に使用したフィラメント使用量と, サポート材および全体の経過時間を表 1 に示す.

表 1 フィラメント使用量と経過時間の比較

	標準的な手法	提案手法
サポート材のフィラメント使用量 (g)	4.45	1.59
全体のフィラメント使用量 (g)	8.05	5.19
サポート材の造形時間 (min)	20.45	8.18
総時間 (min)	41.07	28.22

提案手法により, サポート材のフィラメント使用量を約 64.27%, 全体のフィラメント使用量を約 35.53%削減できた. また, サポート材の造形時間を約 60.00%, 総時間を約 31.29%削減できた. 表面品質については, 目視評価の結果, 提案手法においては一部粒状の堆積を確認した. 造形結果を図 4 に示す.

## 5. 議論

本研究では, 熱溶解積層方式の開放型 3D プリンタにおいて, ヘッドが動的にピンアレイを引き出し, 支持構造を構築する手法を提案し, その効果を検証した. 本節では, 結果を踏まえた提案手法の有用性, 制約, 展望について述べる.

### 5.1 本手法の有用性

Scrappy や Substiports ではユーザがサポート挿入のために造形中に待機する必要があったが, 本手法では造形中のユーザによる介入を不要にした [5, 6, 4]. これにより, ユーザの介入を待機した場合に発生する温度や造形品質の低下を最小限に抑えられる.

また, 多軸プリンタや可動式ベッドと異なり, 本手法は既存の開放型 FDM 3D プリンタにアタッチメントを追加することで実現可能である [1, 7]. これらのアタッチメントは, 独立した動力源を必要とせず, 3D プリンタのヘッ

ドのみによって制御される. そのため, ユーザは G-code の編集のみで本手法を実現できる.

さらに, 本手法で用いるアタッチメントはピン以外をすべて 3D プリンタで造形できるため, 導入が容易である. これにより, ユーザは使用する 3D プリンタに合わせて適切なアタッチメントを選択, 設計して用いることができる. アタッチメントの制作に 3D プリンタを用いることで, 手作業による制作よりも本手法の再現性が高まる可能性がある.

### 5.2 課題と展望

本手法の実用化に向けては, プリンタ構造への依存とアタッチメントの設計, 運用上の複雑さという 3 つの課題が明らかになった.

まず, プリンタ構造への依存が挙げられる. Bed Slinger 構造ではベッドの前後運動に伴う振動がピンに伝わり, 位置ずれが発生する. CoreXY や H-Bot 方式ではベッドの移動が上下方向に限定されるため, この問題は軽減される. しかし, これらの方式の場合は特に 3D プリンタのフレームとの干渉を考慮した土台設計が必要となる. また, プリンタの Z 軸構成によりピンアレイの配置可能位置が制限される. シングル Z 軸の場合はベッドを挟んで反対側に配置することができるが, デュアル Z 軸の場合はベッドの稼働軸に沿った方向に配置せざるを得ず, 振動による位置ずれを防ぐ工夫が必要となる.

ピンの設計に関する課題もある. 現状のピンは幅が広く厚いため, 精密な位置決めが困難である. また, ピンの材質は, ノズルからの熱に耐えうる融点と, ヘッドによる上からの圧力に耐えうる強度および硬度が必要である. 3D プリンタで出力したピンを使用できれば, 導入がさらに容易になる.

また, G-code の編集にも課題がある. G-code の編集は事前知識を必要とし, 不十分である場合に造形品質に影響する可能性がある. 本研究では Python スクリプトを用

いてサポート材を造形する部分の G-code を一定の範囲で自動で除去できたが、削除したサポート材の近傍においてフィラメントの粒状の堆積が確認されたことから、除去が不十分であったと考えられる。さらに、複雑な形状のサポート材を持つモデルに対してはスクリプトによる不要部分の削除処理が困難であり、手動での調整が必要となる。造形する 3D モデルのサイズによっては G-code が数万行に達する場合があるため、すべて手作業で編集することは現実的ではない。

今後の展望として、まずスライサへの本手法のための G-code 自動生成機能の実装が挙げられる。スライサにこの機能を統合できれば、プログラムや手作業での再編集を省き、G-code の最適化により表面品質の向上も見込める。また、Bed Slinger 方式や CoreXY 方式といった異なる構造のプリンタでの検証を通じた土台設計の汎用化も必要である。さらに、応用例として、本手法のヘッドによるピンアレイの制御を活かした、造形物内部へのオブジェクト埋め込みが挙げられる。具体的には、支持ピンに電子部品や鈴などの物体を事前に配置し、造形プロセスの中でそれらを造形物内部へ自動的に組み込むといった活用が可能である。これは、片倉らの研究に見られるような、3D プリンタによる自動組立への応用可能性を示唆している [3, 2]。

## 6. おわりに

本研究では、既存の開放型 FDM 3D プリンタに低コストなアタッチメントを追加することで、ユーザの介入なしに動的な支持構造の構築を行う、DynaPin を提案した。

提案手法では、ヘッドをマニピュレータとして転用することで造形時の支持ピンの制御を自動化した。Gymnast モデルを用いた造形実験において、全体のフィラメント使用量を約 35.53%、造形にかかる総時間を約 31.29%削減し、造形開始後のユーザ介入を必要としない造形を実現した。

一方で、Bed Slinger 構造における振動問題や、ピン設計の最適化など、課題も明らかになった。今後は、スライサへの機能統合や、他の 3D プリンタへの対応を進め、本手法の汎用性を高めていく。

## 参考文献

- [1] Grutle, Ø. K.: 5-axis 3D Printer, Master's thesis (2015).
- [2] Katakura, S., Kuroki, Y. and Watanabe, K.: A 3D printer head as a robotic manipulator, *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 535–548 (2019).
- [3] Katakura, S. and Watanabe, K.: Printmotion: Actuating printed objects using actuators equipped in a 3D printer, *Adjunct Proceedings of the 31st An-*

*nual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 137–139 (2018).

- [4] Wall, L. W., Jacobson, A., Vogel, D. and Schneider, O.: Scrappy: Using scrap material as infill to make fabrication more sustainable, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–12 (2021).
- [5] Wall, L. W., Schneider, O. and Vogel, D.: Substiports: User-Inserted Ad Hoc Objects as Reusable Structural Support for Unmodified FDM 3D Printers, *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–20 (2023).
- [6] Wall, L. W., Schneider, O. and Vogel, D.: Scrappy and Substiports: User-Inserted Ad Hoc Objects For Faster, More Sustainable 3D Printing, *Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–5 (2024).
- [7] Xu, Y., Wang, Z., Gong, S. and Chen, Y.: Reusable support for additive manufacturing, *Additive manufacturing*, Vol. 39, p. 101840 (2021).
- [8] 高橋治輝, 宮下芳明: 熱溶解積層方式 3D プリンタの造形工程の観察と介入を前提とした一時停止命令の再設計, *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 20, No. 1, pp. 135–146 (2018).