

水平面の造形を用いて 3D プリンタの造形領域を拡張する手法の提案

高橋 治輝*¹ 宮下 芳明*¹

A 3D Printing Technique that Extends a Printing Area by Printing a Horizontal Plate

Haruki Takahashi*¹ and Homei Miyashita*¹

Abstract – We present a new 3D printing technique that can print a horizontal plate in-mid-air by setting up pillars as support structures. Using this technique, we extend a platform and capability of fused deposition modeling printers. Our technique allows users to print a large amount of objects in one complete printing process. In addition, users can control a printer using the remote access so that our technique does not require users to remove previously printed ones. In this paper, we describe in detail a technique to print a horizontal plate in-mid-air, and implement a layout design system for effectively using our technique. We show the effectiveness of our technique by printing examples.

Keywords : 3D printer, digital fabrication, platform, mass production, horizontal plate

1. はじめに

3D プリンタを代表とするデジタル工作機器の発展により、ユーザは高精度で自由な 3D 形状の物体を作り出すことが可能になった。近年では、特に熱溶解積層方式 3D プリンタの普及と低価格化が進んでいる。熱溶解積層方式は、光造形方式やレーザ焼結方式のものに比べて、3D プリンタ本体と造形のための樹脂、維持費用などが安価に抑えられることが特徴である。利用できる樹脂の種類も幅広く、導電性樹脂やフレキシブル樹脂などはさまざまな造形物の出力に使用されている。また、安全かつ容易に操作することができるため、ラボやファブリケーションスペース、一般家庭などでも導入されている。こういったテクノロジーの普及を背景として、熱溶解積層方式 3D プリンタをどのように扱うか、どのように拡張するかなどの可能性追究が盛んに行われている。

本稿では、熱溶解積層方式 3D プリンタの能力拡張のため、プリンタに搭載されているプラットフォームに注目する。3D プリンタは、プラスチックの樹脂を押し出すことで造形を行っていくが、この樹脂を受け取る役割を担うのがプラットフォームである。現在の 3D プリンタのプラットフォームは、その大きさによって 3D モデルの同時造形数に制約をかけている。また、次の造形の準備として、プラットフォームから造形物を取り除く作業が必要になる。

このようなプラットフォームの制限を乗り越えるべ

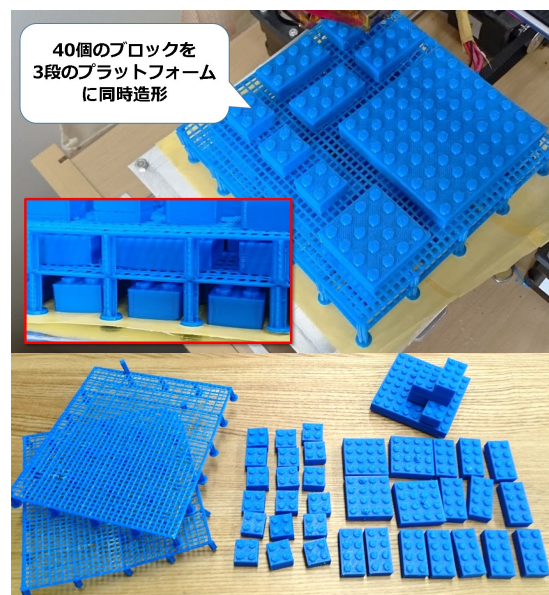


図1 提案手法でブロック 40 個を同時造形した様子と取り外した造形物

く、3D プリンタ自身に新たなプラットフォームを造形させ、造形物を積層するように連続して造形を行っていく手法を提案する(図1)。これにより、3D プリンタの高さ方向の大きさを活用して、本来のプラットフォームに収まりきらない大量の 3D モデルを一度の造形工程で作ることを実現する。また、プラットフォームに造形物が残っている場合でも、新しいプラットフォームが造形されてさえいれば、そのまま連続して造形することが可能になる。造形完了ごとに行わなければならない取り外し作業の削減が実現できるだけでなく、リモートアクセスで 3D プリンタを制御する環境が構

*1: 明治大学大学院理工学研究科新領域創造専攻デジタルコンテンツ系

*1: Graduate School of Science and Technology, Meiji University

築できる。これらの手法は、ソフトウェアとしての実装で完結しており、従来の3Dプリンタにハードウェアの改良なしで適用可能である。

提案手法のためには、プラットフォームの役割を果たす水平面を空中に造形できる仕組みが必要になるが、この造形は従来の熱溶解積層方式では不可能である。そこで、サポート構造として水平面を支える柱を造形し、造形時のプリンタヘッドの移動経路を改善することでこの造形を実現した。本稿では、この水平面を「プラットフォーム層」と呼び、詳細なデザインと造形方法を提供する。

提案手法の利用には、プラットフォーム層を造形するための樹脂と造形時間という追加コストがかかる。これは、樹脂の使用量削減や造形の高速度化など、近年のファブリケーション研究の潮流に反するコンセプトである。しかし、プラットフォームによる制約を乗り越えるひとつの手法として、また、熱溶解積層方式3Dプリンタの新たな可能性を切り拓くアプローチとして重要な研究であると考えている。

以降、2章で本稿に関連する技術・研究について整理し、提案手法の位置付けを明らかにする。3章で本稿が提起する問題を詳細に述べ、これらに提案手法を適用した例を紹介する。4章でプラットフォーム層の要件とデザインについて述べ、空中に水平面を造形する方法を詳細に述べる。5章で提案手法を有効に活用するために構築したレイアウトデザインシステムについて紹介する。そして、6章で提案手法に関する議論を行い、7章を本稿のまとめとする。

2. 関連研究

ここでは、提案手法に関連する研究について述べ、研究としての位置付けを明らかにする。

2.1 3Dプリンタの造形手法

熱溶解積層方式3Dプリンタに独自の命令を送信したり、ハードウェアを増設したりすることで、新たな造形手法を実現する研究が盛んに行われている。

Laputらは、樹脂の糸引き現象を活用して、髪の毛のように細い形状を造形することを実現している^[9]。この現象を制御することで、髪の毛のように細い形状を造形することを実現した。Muellerらは、3Dモデルの忠実度を下げて、ワイヤーフレームモデルとして造形する高速化手法を提案している^{[10][11]}。この手法は、ファームウェアの書き換えで一般的な3Dプリンタにも適用することができる。Encore^[12]は、すでに造形されたものや日用品に、新しい機能を付け加えるための造形手法である。対象を柱のようなサポート構造で安定させ、その上に直接造形することで機能を拡張する。

Patching Physical Objects^[13]では、では、回転するプラットフォームと造形物を削り取るミリングマシンを搭載した3Dプリンタを構築している。造形物の作り直しや修復など、新しい造形工程を可能にした。RevoMaker^[14]では、造形物を両端から挟み込んで回転させるプラットフォームを搭載した3Dプリンタを構築している。さまざまな角度から造形できるため、電子回路などを包み込むように造形が行える。また、Project Escher^[8]では、巨大な造形物の出力を目指して、複数のプリンタヘッドや大判のプラットフォームを搭載した3Dプリンタを構築している。

本稿では、3Dプリンタの新たな造形手法として、空中に安定した水平面を作ることを実現する。また、提案手法は熱溶解積層方式の3Dプリンタに適用することができ、ハードウェアの増設および改良は不要である。

2.2 サポート構造

熱溶解積層方式で複雑な3Dモデルを造形するためには、サポート構造が必要不可欠である。しかし、多くのスライスソフトウェアでは、空中に突き出している部分(OverHang^[2])とプラットフォームとの間にサポート材が充填されてしまい、樹脂の浪費、造形時間の増加を招く。そのため、より賢いサポート構造をデザインするという研究が広く行われている。

Clever Support^[15]では、木構造のサポートを提案している。プラットフォームから伸びた幹から、3Dモデルを支えるように枝を伸ばし、不安定なところを支えるような構造を構築する。このようなサポート構造はMeshMixer^[16]を用いて、実際に付加することができる。Bridging the Gap^[17]は、安定したサポートを作るためにブリッジ構造(橋渡しをするような造形)を活用している。木構造の場合、造形される高さによってサポート自身が不安定になることがあり、この点を解決した研究といえる。また、サポート材ができるだけ少なくなるように3Dモデルを変形させる手法^[18]や、造形物の目立つところにサポート材が付着しないようにする研究^[19]なども見られ、造形品質向上のために精力的に取り組まれているテーマであるといえる。

本稿の提案手法では、空中に水平面を造形するためのサポートとして柱を立てている。これは、Bridging the Gap^[17]のブリッジ構造に関する知見を参考にしており、この構造をブリッジから平面へと拡張したものと見える。

2.3 造形の安定化

3Dプリンタの造形失敗の原因は造形対象の3Dモデルにあることが多い。造形代行サービスなどでは、3Dプリンタの制約を考慮したモデリングのチュート

リアル^[3] がまとめられており、ユーザはモデリング時にこれらに注意する必要がある。一方で、こうした制約が事前に分かっているため、3D モデルの問題部分を解析してユーザに提示したり、自動修正を行うことが可能になっている。

Stress Relief^[20] は、造形を前提とした3D モデル修正システムである。修正方法として、3D モデルを空洞化する（重量による負荷を修正）、弱い部分を太くする、全体を安定させるための支柱を付け加える手法を用いている。これ以降、3D モデルを修正する研究は急速に発展し、さまざまな手法が提案されている。例えば、3D モデルの内側にスキンプレーム構造を付加する研究^[21]、ハニカムライクな構造で樹脂の使用量と造形物の安定性を最適化する研究^[22] などが挙げられる。これらはマテリアルの削減量や外圧に対するロバスト性を計測したり、Stress Reliefで最適化された3D モデルとの比較を行ったりして、手法の有効性を主張している。

Clean Color^[23] は、高品質な2色造形を実現した研究である。造形時のプリンタヘッドの移動経路を最適化し、あふれる樹脂を拭き取るための城壁を造形するといった高品質化の仕組みを導入している。手法の実現のために、2倍近くの樹脂と造形時間を必要とするが、それだけのコストを払ってでも高品質な造形を実現したい、というニーズに応える重要な研究である。

本稿の提案手法は、空中に安定した水平面を作り出すことを必要とするが、この構造はそもそも造形が難しく、これまでに十分に研究されていない。また、Clean Color^[23] と同様に、プラットフォーム層の造形とそれによる3D プリンタ利用の効率化のために、追加の樹脂や造形時間というコストを払っても良いというアプローチをとる。

2.4 3D モデルの分割・統合

プラットフォームの大きさ以上の3D モデルを造形するために、3D モデルを小さなパーツに分割するという研究が行われている。

Chopper^[24] は、3D モデルを分割することで造形可能なサイズのパーツに変換するという研究である。造形後の組み立て作業なども考慮されており、ユーザが好む条件に基づいて分割することが可能である。この分割手法を発展させ、パーツを一つのまとまりに統合することで、造形回数を削減する研究が多くなされている。例えば、分割数と全体の大きさが最小になるように分割・統合する手法^[25]^[26]、テトリスのように指定された空間に詰めていく手法^[27]、レベルセット法を用いた統合^[28] などがあげられる。

本稿の提案手法は、特に3D モデルの同時造形数に注目している。さらに、プラットフォーム層の造形は、

次の造形時にも活用可能なものであり、造形回数の削減と作業の効率化が期待できる。

2.5 造形物の取り外し

3D プリンタの造形完了後、ユーザは造形物をプラットフォームから取り外す必要があるが、強力に接着した造形物を剥がす作業には多大な労力を要する。こうした問題を解決するために、3D プリンタやハードウェアの改良・工夫などが行われている。

NVBOTS^[5] は、造形物を取り外すヘラのようなツールを搭載した3D プリンタ NVPPro を開発している。このツールは造形完了後にプラットフォームの表面を拭き取るように駆動し、造形物の取り外しとプールへの移動を実現している。一方で、造形物が接着するプラットフォーム側を工夫することで、取り外し作業を容易にする改良も見られる。Zortrax M200^[6] は、小さな穴の空いたプラットフォームを搭載しており、造形物の取り外しが容易に行えるような仕組みになっている。また、プラットフォームに敷いたシート上に造形を行うといった取り組みも見られる^[7]。造形物はシートとともにプラットフォーム外に引き出されるため、取り外し作業と次の造形への移行をよりスムーズに行うことができる。本稿では、こういったハードウェアの改良を要求せず、造形パスの工夫とソフトウェアの実装で連続した造形を実現する。そして、大量の造形物の出力を一度にまとめあげ、取り外し作業の回数を削減、遠隔地からの利用を可能にする。また、プラットフォーム層は網目状の構造をしており、造形物が取り外ししやすいようなデザインになっている。

3. 提案手法と活用例

ここでは、本稿が提起する問題について詳細に述べ、提案手法がどのようにこの問題を解決するか、実際の活用例（図2）とともに紹介する。造形には熱溶解積層方式3D プリンタである Atom¹ を使用した。なお、この3D プリンタの造形領域は幅140mm、奥行140mm、高さ120mm である。

3.1 プラットフォームの大きさ問題

3D プリンタが造形可能な3D モデルの大きさは、プラットフォームの大きさと3D プリンタのZ（高さ）方向の大きさによって決まる。一般的に、熱溶解積層方式3D プリンタのプラットフォームは150~200mm 程度の正方形であり、3D モデルはこの領域に収まるように配置されなければならない。プラットフォームの拡大という解決方法が考えられるが、これにはハードウェアの改良が伴うため容易ではない。また、巨大な3D プリンタを設置するためのスペースも必要になり、小型の3D プリンタのメリットとも競合すること

1: <http://genkei.jp/3d-printer/>



図2 提案手法の活用例。(a) 20個の自作3Dプリンタパーツを同時造形した例。(b) プラットフォームから取り除いた様子。(c) リモートアクセスで3Dプリンタを制御し、プラットフォーム層を活用して造形を行った例。

表1 作例の詳細

| 造形モデル | 柱・水平面の数と大きさ (mm) | | 造形時間* (hh:mm:ss) | | 樹脂使用量 (mm) | | | |
|------------------|------------------|--------------------|------------------|----------|------------|-------|--------|--------|
| | 柱 | 水平面 | 柱・水平面 | 全体 | 柱 | 水平面 | 3Dモデル | 全体 |
| ブロック 40個 (図1) | 30本 高さ 24.5 | 2枚 幅 124 奥行 119 | 2:46:56 | 12:07:40 | 2,616 | 5,530 | 40,082 | 48,228 |
| パーツ 20個 (図2a) | 30本 高さ 22.1 | 1枚 幅 123 奥行 117 | 2:02:53 | 9:51:04 | 2,364 | 2,598 | 33,306 | 38,268 |

*注：造形時間は Repetier-Host(<http://www.repetier.com/>) から得られた推定値。

柱・水平面の造形時間は、これらの構造を3Dモデルなしで造形した場合の推定値。移動経路の変化は考慮されていない。

になる。

これに関して、田中は「3Dプリンタの『大きさ』によって自分たちの想像力に無意識の制約をかけている」^[1]と述べている。これはプラットフォームの大きさに対しても同様である。例えば、プラットフォームに十分な余裕があれば、大量の3Dモデルを一度の造形プロセスで作上げることができ、ものづくり全体の作業や試行錯誤を高速化することができる。さらに、3Dプリンタの能力が評価されて、あらゆる3Dモデルが造形を前提として作られるようになっていく。その中には、多数のパーツで組み上げるハードウェアや、同形状のブロックを複数個組み合わせる玩具もあり、これらは大量の造形物を出力する状況を生む。

提案手法は、プラットフォーム自体を新しく造形するという方法でこの大きさ問題を解決する。図1に40個のブロック玩具、図2a, bにオープンソース3Dプリンタの20個のパーツ²を同時造形した例と、それぞれを取り外したあとの様子を示した。表1には、これらの造形内容の詳細と造形時間、樹脂使用量を記載した。各造形例の3Dモデルは、幅120mm、奥行120mm程度の領域に合わせてレイアウトされており、その大きさに従った水平面とそれを支える30本の柱が構築された。3Dモデルおよび柱は積層ピッチ0.2mm、水平面は積層ピッチ0.1mmで造形されている。また、40個のブロックを同時造形した例では、すべてのモデルを造形領域に収めるために2枚の水平面を必要と

した。

造形時間は、柱と水平面の構造だけ造形した場合と3Dモデルも含めた全体を造形した場合の推定値である。実際は、柱や水平面が全体の一部として並行して造形されていくため、移動経路によって造形時間が変化したが、提案手法によって2時間程度の追加の時間が発生することがわかる。また、この大きさの水平面にかかる時間は35分程度である。樹脂使用量は、全体に使用される樹脂量と3Dモデルのみを造形した場合の樹脂量より算出しており、柱と水平面を追加することによって、ブロックの造形例では8,146mm、パーツの造形例では4,962mmだけ増加している。

従来、このような大量の3Dモデルは複数回に分けて造形していくことが一般的であった。提案手法は、これらを一度の造形工程にまとめあげる。また、本稿では、このような造形物の配置を容易にし、提案手法を活用するためのシステムを実現した。これについては、5章「レイアウトデザインシステム」で述べる。

3.2 3Dプリンタの遠隔操作

3Dプリンタの発展により、キャリブレーションや樹脂の管理など、さまざまな作業が自動化されている。しかし、プラットフォームに残った造形物の取り外しは依然として手作業で行わなければならない。

さらに、この取り外し作業は、造形完了したものを得るための作業であるとともに、次の造形のための準備でもある。そのため、連続して造形を行っていく際は、ユーザが3Dプリンタの側に居る必要があり、造形のたびに取り外し作業を行わなければならない。例

2: https://github.com/hironaokato/atom_rc

えば、ラボに3Dプリンタがあり、リモートアクセスで造形指示を行えるような環境を構築したとしても、プラットフォームに残っている場合は造形を開始することができない。MakerBot Replicator^[4]のように、カメラを搭載した3Dプリンタも登場しているが、取り外し作業の必要性から、造形物を監視する以上のことはできない。

提案手法では、プラットフォームに残っている造形物の上に、次の造形のためのプラットフォーム層を作っておくことができる。図2cは、3Dプリンタ制御用のPCにリモートアクセスし、プラットフォーム層に造形を試みた例である。状況として、ラボ内で3Dプリンタが共有活用されており、プリンタ制御用のPCと監視用カメラが設置されていることを想定している。

リモートアクセスしたユーザは、3Dプリンタの造形が完了しており、プラットフォームに造形物が残っていることを確認する。ここで、前回プリンタを利用したユーザが、プラットフォーム層を付加してくれたことに気付く。3Dプリンタは、プラットフォーム層の造形完了時の高さになっているため、この位置をホームポジションとして造形を続ければ、取り外し作業の必要なく造形が可能になっている。そこで、造形したい3Dモデルをスライスして得られたGcode(3Dプリンタを制御する命令)に記述されているホームポジション設定を、現在の高さとする命令(G92 Z0)に書き換えて造形を開始した。

このような3Dプリンタの共有は、従来の造形工程では不可能であり、提案手法が有効活用される状況である。この手法で必要になるのは、プラットフォーム層が連続した造形に耐え得る程度に安定していることである。これについて、4章「プラットフォーム層のデザイン」で、詳細な造形方法を述べる。

4. プラットフォーム層のデザイン

提案手法が造形するプラットフォーム層の満たすべき要件を整理し、それにもとづいた造形方法について述べる。なお、造形には3章と同じ3Dプリンタを使用した。

4.1 要件およびデザイン

提案手法では、空中にプラットフォーム層として機能する水平面を造形するために、適切な位置に柱を立て、これらをサポートとしてブリッジ構造を造形していく(図3)。まず、このプラットフォーム層の満たすべき要件とその実現方法について述べる。

・水平面であること

積層される造形物を安定させるためには、プラットフォーム層を安定した水平面にすることが必要である。しかし、この造形は単純にブリッジ構造を連続させた

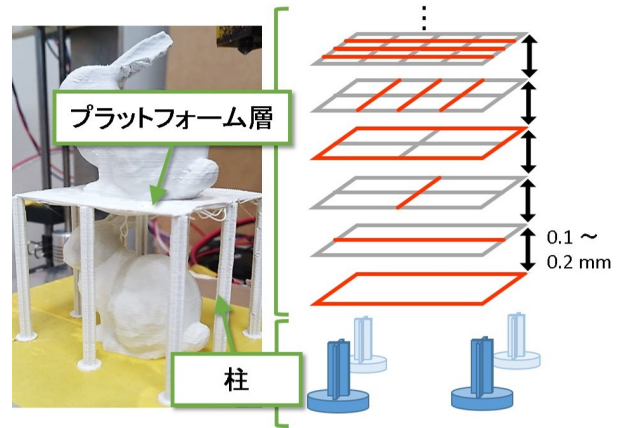


図3 プラットフォーム層のデザイン。ブリッジ構造の積層ピッチは樹脂に依る。ABS樹脂では0.1mm程度、PLA樹脂では0.2mm程度で積層すると良い。

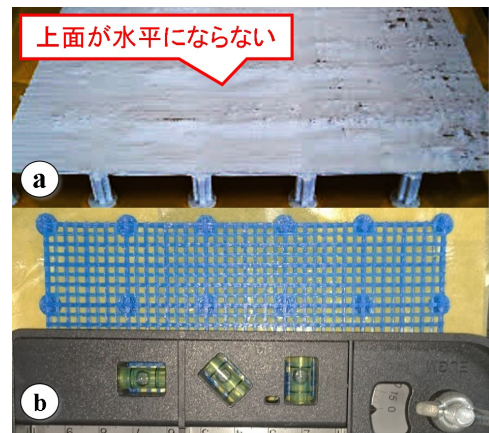


図4 水平面造形の比較。(a)ブリッジ構造を並べて造形した平面。(b)提案手法の平面と網目構造の詳細。

り、従来の平面をそのまま浮かせるだけでは不可能である。原因として、すでに造形されたブリッジに接するように高温のプリンタヘッドが移動することがあげられる。この状況が続くと、熱によるブリッジ構造の変形が生じ、造形される平面が大きく波打った形状になってしまう(図4a)。

この現象を考慮し、ブリッジ構造を一定間隔だけ離して造形し、網目状の構造になるように積層する方法を考案した(図4b)。この方法であれば、まだ造形が不安定な低層で、ブリッジとプリンタヘッドとの接触を避けることができる。そして、積層のたびに網目を細かくして造形を繰り返すことで、ブリッジ構造の距離を少しずつ短くしていく。水平面を構築する低層のブリッジ構造の中には、樹脂が垂れ下がるように歪む部分も生まれるが、同じ構造の造形を繰り返すことで上面を安定させることができる^[17]。最終的には、本

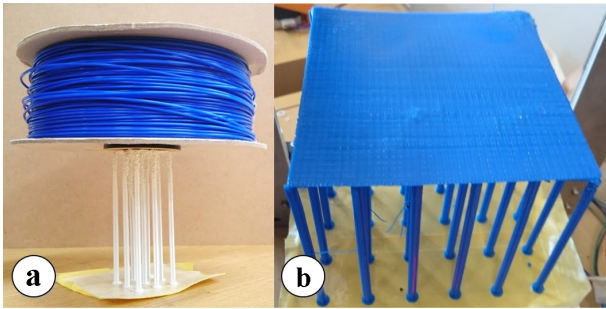


図5 柱と水平面の安定性. (a) 40 × 40 mm の水平面に 1kg の樹脂リールを荷重として乗せた様子. (b) 120 × 120 mm の水平面をソリッドになるまで造形した例. なお, 高さは両者とも 100 mm.

来のプラットフォームと遜色のない水平面となり, 積層される造形物を安定して受けることができる.

・十分に丈夫であること

プラットフォーム層は, その上に積層される造形物の荷重に十分耐えられる程度に丈夫であることが必要である. そのためには, プラットフォーム層を支える柱が十分に安定している必要がある.

デザインの初期段階で, さまざまな形状の柱を造形した結果, 柱として安定しない形状があることが明らかとなった. 例えば, 細い円柱を造形すると, 多くの場合は途中で折れてしまう. これは, 円柱を造形する際のプリンタヘッドが, 全体を捻るように動くことが原因であると推測される. このような試行錯誤を繰り返した結果, 提案手法では, 上から見た時に「+」になるような柱の構造を採用した. そして, 3D プリンタのプラットフォームと接触する最下層部分に全体を安定させるためのベースを持たせた. 図5に, この柱を 100 mm まで伸ばしてプラットフォーム層を構築した例を示す. プラットフォーム層を安定させるとともに, 1 kg の樹脂リールを全て使用するような造形物の重量にも耐える強度を実現できている. また, 本研究で用いた 3D プリンタの高さ方向は 120 mm であり, この領域を活用するために必要な高さの水平面が造形できることを確認した.

・積層された造形物が容易に取り外せること

さらに, プラットフォーム層が水平面として安定しているほど接地面積が増え, そこに積層される造形物との接着が強固になる. これによって造形物の取り外しが困難になることが予想される.

しかし, プラットフォーム層は網目状の構造を作っていくため, この網目を意図的に残すことによって, 接地面積を減らすことができる. こうした穴の空いたプラットフォームは Zortrax M200^[6] に実際に搭載され

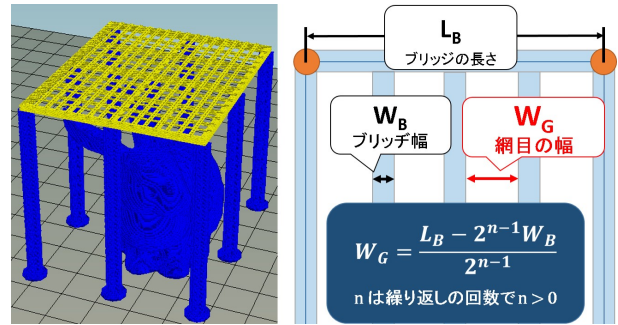


図6 プラットフォーム層の造形プレビューと網目の詳細

ており, 造形物の取り外しを容易にする工夫として知られている. そのため, 積層される造形物をプラットフォーム層から僅かに浮かせるだけで, プラットフォーム層をラフト構造(プラットフォームへの接地面積を減らす構造)としても活用することができる. 図1に, 造形物の取り外し後の様子を示したが, 正しく積層されれば, プラットフォーム層をほとんど壊すことなく取り外しが可能である. 万一, 樹脂の特性などで接着してしまった場合でも, プラットフォーム層ごと引き剥がし, ヤスリなどで底面の後処理を行えば良い.

4.2 造形手法

前述した要件を満たすようにデザインしたプラットフォーム層の造形プレビューを図6左に示す. なお, 造形時のプリンタヘッドの移動速度は, 1800 mm/min であり, ひとつのブリッジ構造は, 0.35 mm ピッチで3列並ぶように造形する. また, 別のブリッジへの移動時は, 樹脂の溢れを防止するために 4 mm だけ樹脂を引き戻し, 造形開始時に 4 mm だけ押し出して再充填させる.

まず, 水平面を作るための柱を造形する. ここで, ブリッジ構造でサポートを作り出す研究^[17]の知見を参考にし, 柱の間隔は最大で 30 mm とした. 柱は, 配置によって 3D モデルに乗ってしまう場合があるが, 現在はこの状況を許容している(造形物にサポート材が乗る状況は, 従来のスライスソフトウェアでも起こり得るため, 造形後の処理を行えば問題ないものとする).

次に, 柱の間にブリッジ構造を造形する. この構造は図3右で示したように複数層に分かれており, 全体の枠・X軸方向のブリッジ・Y軸方向のブリッジの3つの構造を繰り返しながら平面を構築していく. そして, 繰り返しのたびにX軸・Y軸方向のブリッジの密度を, 各ブリッジ構造の長さを二分割するように上昇させる. 本稿では, この繰り返しの回数を4回に設定して網目状の構造を作り出している.

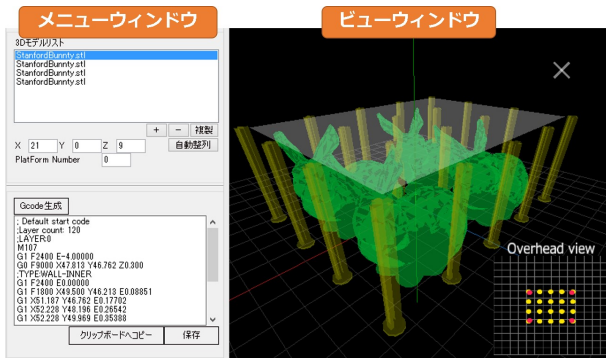


図7 システムの概観.

最終的な網目の細かさは図6右のように計算することができる。本研究の条件では、ブリッジ構造の長さ L_B の取り得る値は15~30 mm, 繰り返し回数 n は4回となる。また、ブリッジ構造の幅 W_B は1.2 mm程度になる(造形後にノギスで測定)。これらをもとに、網目の幅 W_G を計算すると0.68~2.55 mmの細かさになることが計算できる。実際に、網目の幅を測定すると、ブリッジの太さによる誤差はあるものの、計算通りの幅で造形されていることが分かった。また、網目の細かさは柱の間隔によって異なるが、積層させる造形物の大きさに応じて繰り返し回数を変更することで対応できる。

5. レイアウトデザインシステム

提案手法を活用するために実装したレイアウトデザインシステムについて述べる。システムは、従来のホストアプリケーションと同様に、3Dモデルを配置し、Gcodeへとスライスすることができる。また、自動整列機能を搭載しており、プラットフォーム層の造形を駆使して、大量の3Dモデルをひとつの造形工程にまとめあげる。なお、システムの実装にはビジュアルプログラミング言語 `vvvv`³ を使用した。

5.1 システム概要および使用方法

システムの概観を図7に示す。システムは、メニューウィンドウとビューウィンドウからなり、ユーザはメニューを操作しながら3Dモデルの配置を行っていく。また、ビューにおいてマウス左ボタンドラッグをカメラの回転、右ボタンドラッグをカメラの拡張に割り当てている。

まず、ユーザはメニューのボタンを操作して、システムに3Dモデルを読み込ませる。システムは、3Dプリンタ用の3Dモデルデータの形式として一般的なSTL形式をサポートしている。読み込まれた3Dモデルはビューに表示され、同時にプラットフォーム造形

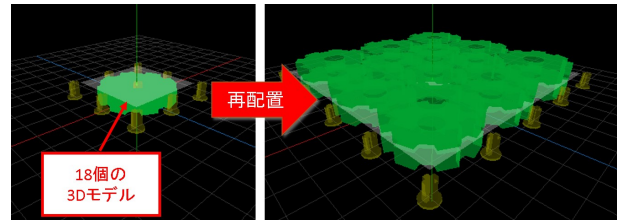


図8 3Dモデルの自動再配置(配置できるスペースがない場合は、2段目のプラットフォーム層に自動配置される)

のための柱の位置が設定される。なお、複製ボタンで同じ3Dモデルを複数個配置することも可能である。

次に、各3Dモデルの位置調整を行う。ユーザは、メニューから設定対象の3Dモデルを指定し、位置座標を入力していく。この作業を効率的に行うために、ビューウィンドウ下部に上面図をウィンドウを表示している。この情報は、プラットフォーム層の大きさを決定する際に利用することを想定しており、柱の位置と3Dモデル四隅の頂点のみが表示されている。また、自動整列ボタンとして、この配置作業を自動で行う機能も実装した(図8)。

最後に、メニューからGcode生成を選択し、配置した3Dモデルと柱をGcodeへと変換する。スライサは外部のソフトウェア(CuraEngine⁴)を用いており、コマンドラインから呼び出す形でシステムと連携させている。このとき、設定ファイルを読み込んで積層ピッチや内部構造、サポート材の有無を設定する。なお、ここでスライスされるのは3Dモデルと柱のみであり、プラットフォーム層は別途生成されてあとから統合される。生成されたGcodeは、メニューウィンドウ下部に表示され、テキストファイルとして保存したり、クリップボードにコピーして活用する。このGcodeを、Repetier-HostなどのGcode編集をサポートしているホストアプリケーションで読み込み、通常と同じ流れで造形を開始すれば良い。

5.2 3Dモデルの自動配置

ビューウィンドウに配置された3Dモデルを自動で再配置する機能であり、長方形詰め込み問題の近似解法のひとつであるBLF法(Bottom-Left Fill Algorithm)を用いて実装した。

システムは、レイアウトされたすべての3Dモデルの大きさを取得して、それらを降順にソートする。そして、事前に指定されたプラットフォームの大きさに収まるように、BLF法による充填を行う。ここで、各3Dモデルに対して造形されるプラットフォームを示すIDを割り振り、一つ目のプラットフォームに充填

3: <https://vvvv.org/>

4: <http://reprap.org/wiki/Cura>

しきれなかった 3D モデルは次のプラットフォームへと自動で配置していく。

5.3 柱とプラットフォーム層の生成

レイアウトされた 3D モデルの大きさと位置情報から、全体を覆うようなバウンディングボックスを生成する。そして、このバウンディングボックスの大きさから、プラットフォーム層を支える柱の位置を決定する。このとき、柱にかかるブリッジが 30 mm 以上の長さになる場合は、その間にさらに柱を追加して距離の調整を行う。

柱の位置が決定したら、プラットフォーム層の位置と大きさを計算して、造形のための Gcode を作り出す。高さの位置決定にはバウンディングボックスの Z 軸方向の大きさを利用しており、一番高い 3D モデルの上に 1 mm のスペースを開けるように設定する。同様に、プラットフォーム層とそこに積層される 3D モデルとの間にも、取り外しを容易にするために 0.1 mm のスペースを設ける。

5.4 Gcode の結合

システムは配置された 3D モデル全体を一度 STL ファイルへと書き出し、外部のスライサ (CuraEngine) を呼び出す。そして、Gcode の生成結果を取得したのち、プラットフォーム層の Gcode と結合する。CuraEngine が書き出す Gcode には、レイヤごとにコメントが挿入されているため、このコメントを調べていくことで、プラットフォーム層の Gcode を挿入する位置を決定する。

なお、個別に生成したことから、配置された 3D モデルの樹脂の押出位置と、プラットフォーム層の樹脂の押出位置は異なっており、そのままの結合だけでは大幅なずれが生じる (押出位置は造形開始からの相対的な距離であるため)。これを防ぐため、プラットフォーム層の造形後に、現在の位置を設定するための命令「G92 Z*」を挿入する。ここで、プラットフォーム層の造形後の Z パラメータの値は、積層される 3D モデルの開始時の押出位置より決定する。

6. 議論

ここでは、これまでに述べた提案手法の活用例、プラットフォーム層のデザイン、レイアウトデザインシステムに基づいて、3D プリンタのプラットフォームを拡張する手法としての有効性と現状の制約について議論を行う。

6.1 水平面の造形手法

提案手法によって、空中に安定した水平面を作ることが可能になった。これは、これまでに不可能だった構造を、安定して造形可能にしたという点で新規である。さらに、水平面の造形手法は、本稿で示したプラッ

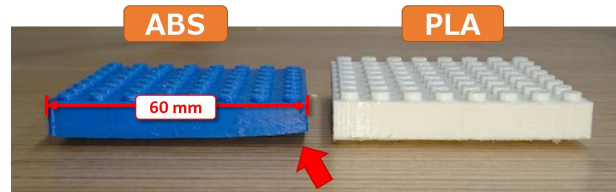


図9 使用樹脂の比較。ABS 樹脂は性質上、高い位置に大きなサイズを造形すると変形する。

トフォーム層以外にも応用が期待できる。例えば、上面が広い造形物を低密度で造形するような状況があげられる。内部密度が低い造形物は上面を支えるための構造が不十分になり、一時的に空中に浮くブリッジのような状態になる。これは、4.1 節で指摘した波打ち現象の発生と同じ状況である。

しかし、ABS 樹脂を使ってこの水平面を造形する場合には、いくつか注意が必要であることがわかっている。ABS 樹脂はその特性上、冷却によって変形が起こることが知られている。薄い平面や小さな造形物はこの影響が少ないが、大きな造形物は上方に反るように変形してしまう。そのため、大きな造形物をプラットフォーム層に積層すると、全体を引き上げるような変形が起こる。図 9 に、高さ 50 mm 程度のプラットフォーム層に積層した造形物の様子を示す。つまり、ABS 樹脂の場合、プラットフォーム層の上に積層できる造形物の大きさに制約があるといえる。一方で、PLA 樹脂にはこのような特性がないため、大きさに関係なく安定した造形が可能である。

柱の間隔とプラットフォーム層の大きさに関して、本稿で設定した最長 30 mm という条件下では積層される造形物に影響をあたえるような歪みは観察されなかった。しかし、柱の間隔が広くなり、プラットフォームの位置が高くなるほど全体の構造が不安定性になる傾向が見られた。提案手法が、多様化している樹脂や 3D プリンタの全てに対応できるかは明らかにできていないが、基本的な構造とその造形方法を提供し、広く普及している ABS 樹脂と PLA 樹脂で造形を確認したことは、3D プリンタの能力拡張のために十分な知見であると考えている。

6.2 3D モデルの同時造形

提案手法により、3D プリンタのプラットフォームに収まりきらない数の 3D モデルを一度に造形することを実現し、造形指示回数を削減することを可能にした。近年、複数のパーツを組み合わせた造形物を、一度の造形で出力するといった試みが精力的に行われており、作業の簡易化や試行錯誤の高速化に関して大きな貢献を果たしている。本研究は、同時に造形できる個数を増やすという方法で、こういった作業の効率化

に貢献するものである。提案手法は、ソフトウェアの実装のみで実現されており、3D プリンタやプラットフォームの改良を要求しない点が特徴である。一方で、同時造形のために追加の造形時間、樹脂を必要とする。例えば、造形例で構築した水平面は、幅、奥行ともに120mm 前後の長方形であるが、これを造形するためには1枚あたり35分程度の造形時間と2,500mmの樹脂が必要となる。この追加コストは全体に使用される割合に比べれば少量であるが、水平面の枚数や柱の本数が極端に増えた場合、高価な樹脂を使用する場合を想定する必要があるだろう。特に、現在は水平面を常に一定の大きさで造形するため、プラットフォーム層に不要な領域が生まれるなどの非効率な状況が起こり得る。

もちろん、従来どおりの環境であっても、3Dモデルの姿勢や配置間隔を詰めることで、同時造形数を多少なり増やすことは可能である。しかし、不安定な姿勢で造形するためにはサポートの付加が必要であり、造形方向によって造形物の強度が問題になる（熱溶解積層方式は樹脂を積み上げていくため、横方向からせん断するような衝撃に弱くなる）。この強度に関しては、詳細に比較する必要があるが、提案手法では、3Dモデルの姿勢を維持したまま造形数を増やすことが可能であり、このニーズに応える柔軟性を兼ね備えている。

また、3Dプリンタは大量生産と相対するものづくり環境であり、提案手法はこのコンセプトに反した位置付けであるといえる。しかし、多数のパーツを要する造形物や、ブロック玩具など、大量に作ることを前提とした3Dモデルは多く見られる。また、仕様の異なるプロトタイプを複数個造形して比較する、といった3Dプリンタの利用方法もあり、大量造形が必要な状況が生まれると考えている。こうした造形物に対して、提案手法は特に有効にはたらく、造形指示と取り外し作業を繰り返す負担を減少させることができる。

6.3 3D プリンタの共有・遠隔操作

プラットフォーム層を造形しておくことで、次の造形開始をスムーズにすることを実現した。これは、「造形物の取り外し」という造形工程で唯一ユーザの手作業が必要になる状況を省略する試みである。遠隔地から制御できる仕組みや、共有利用の決まりを設けることで、より多様な場面で3Dプリンタを活用できるようになるだろう。

しかし、現状の提案手法をこの目的に活用するためには、いくつか課題が残されている。例えば、大きさの著しく異なる3Dモデル上にプラットフォーム層が作られる場合である。このとき、プラットフォーム層の造形位置は、最も大きな3Dモデルの高さに設定されるため、小さな3Dモデルの上部にはデットスペー

スが生まれる。また、次のユーザが造形したい3Dモデルがプラットフォーム層よりも大きい場合、あるいは高さ方向に十分なスペースが確保できない場合は、造形を開始することができない。

このような課題はあるものの、造形完了から次の造形の準備へ、という移行作業に焦点を当てたことが、本稿のひとつの貢献であると考えている。3Dモデリングや造形品質に関する研究は多数なされているものの、造形工程全体に目を向けた研究は例が少ない。著者らは、このような造形工程全体を俯瞰したファブリケーション研究こそ、ヒューマンインタフェース分野の重要なテーマあると考えている。

7. おわりに

本稿では、3Dプリンタ自身に新しいプラットフォームを造形させ、造形領域を高さ方向に拡張する手法を提案した。これによって、同時造形数を増やすとともに、造形物をプラットフォームに残したまま次の造形に移行するという環境を実現した。提案手法のために、空中に安定した水平面を造形する方法を確立し、その造形可能性とプラットフォームとしての安定性を確認した。また、提案手法を有効に活用するためにレイアウトデザインシステムを構築し、実際に造形例を示すことで提案手法の有用性を示した。

今後、3Dプリンタの能力はますます向上し、その性能は高い水準に収束していくことが期待される。著者らは、こうした発展と並行して、3Dプリンタの利用され方に注目した研究が必要であると考えている。本稿の提案手法は、3Dプリンタのプラットフォームという限定されたリソースを、どのように拡張し、共有するかという問題に対して、新しくプラットフォームを作るという方法で改善を試みたものである。

謝辞

本研究は、JST、COIの支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 田中浩也. SFを実現する3Dプリンタの想像力. 講談社現代新書, pp. 146-147, 2014.
- [2] The Innovation Station - Tips for Designing 3D Printed Parts.
<https://innovationstation.utexas.edu/tip-design> (2016年8月9日確認).
- [3] SHAPEWAYS - 3D Printing and Design Tutorials.
<http://www.shapeways.com/tutorials/> (2016年8月9日確認).
- [4] MakerBot - Replicator.
<http://www.makerbot.com/> (2016年8月9日確認).
- [5] NVBOTS - NVPro.

- http://nvbots.com/business/ (2016年8月9日確認).
- [6] Zortrax - M200.
https://zortrax.com/ (2016年8月9日確認).
- [7] Automate the removal and 3D printing of multiple objects with the ECHODrive add-on.
http://www.3ders.org/articles/20150419-automate-the-removal-and-3d-printing-of-multiple-objects-with-the-echodrive-add-on.html (2016年8月9日確認).
- [8] Autodesk - Project Escher.
http://projectescher.com/ (2016年8月9日確認).
- [9] Laput, G., Chen, X. and Harrison, C. 3D Printed Hair: Fused Deposition Modeling of Soft Strands, Fibers and Bristles. In *Proc. of UIST'15*, pp. 593-597, 2015.
- [10] Mueller, S., Beyer, D., Mohr, T., Gurevich, S., Teibrich, A., Pfisterer, L., Guenther, K., Frohnhofen, J., Chen, H.-T., Baudisch, P., Im, S. and Guimbretière, F. Low-Fidelity Fabrication: Speeding up Design Iteration of 3D Objects. In *Proc. of CHI'15 EA*, pp. 327-330, 2015.
- [11] Mueller, S., Im, S., Gurevich, S., Teibrich, A., Pfisterer, L., Guimbretière, F. and Baudisch, P. WirePrint: Fast 3D Printed Previews. In *Proc. of UIST'14*, pp. 273-280, 2014.
- [12] Chen, X., Coros, S., Mankoff, J. and Hudson, S. Encore: 3D Printed Augmentation of Everyday Objects with Printed-Over, Affixed and Interlocked Attachments. In *Proc. of UIST'15*, pp. 73-82, 2015.
- [13] Teibrich, A., Mueller, S., Guimbretière, F., Kovacs, R., Neubert, S. and Baudisch, P. Patching Physical Objects. In *Proc. of UIST'15*, pp. 83-91, 2015.
- [14] Gao, W., Zhang, Y., Nazzetta, D., Ramani, K. and Cipra, R. RevoMaker: Enabling Multi-directional and Functionally-embedded 3D Printing using a Rotational Cuboidal Platform. In *Proc. of UIST'15*, pp. 437-446, 2015.
- [15] Vanek, J., Galicia, J. A. G. and Benes, B. Clever Support: Efficient Support Structure Generation for Digital Fabrication. *Computer Graphics Forum*, 33, 5, pp. 117-125, 2014.
- [16] Schmidt, R. and Singh, K. Meshmixer: An Interface for Rapid Mesh Composition. In *SIGGRAPH 2010 Talks*, 6:1. 2010.
- [17] Dumas, J., Hergel, J. and Lefebvre, S. Bridging the Gap: Automated Steady Scaffoldings for 3D Printing. *ACM Trans. Graph.*, 33, 4, Article 98, 2014.
- [18] Hu, K., Jin, S. and Wang, C. C. L. Support Slimming for Single Material Based Additive Manufacturing. *Computer-Aided Design*, 65, pp. 1-10, 2015.
- [19] Zhang, X., Le, X., Panotopoulou, A., Whiting, E. and Wang, C. C. L. Perceptual Models of Preference in 3D Printing Direction. *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH ASIA)*, 34, 6, Article 215, 2015.
- [20] Stava, O., Vanek, J., Benes, B., Carr, N. A. and Mech, R. Stress Relief: Improving Structural Strength of 3D Printable Objects. *ACM Trans. Graph.* 31, 4, Article 48, 2012.
- [21] Wang, W., Wang, T. Y., Yang, Z., Liu, L., Tong, X., Tong, W., Deng, J., Chen, F. and Lia, X. Cost-Effective Printing of 3D Objects with Skin-Frame Structures. *ACM Trans. Graph.* 32, 6, Article 177, 2013.
- [22] Lu, L., Sharf, A., Zhao, H., Wei, Y., Fan, Q., Chen, Z., Savoye, Y., Tu, C., Cohen-Or, D. and Chen, B. Build-to-Last: Strength to Weight 3D Printed Objects. *ACM Trans. Graph.* 33, 4, Article 97, 2014.
- [23] Hergel, J. and Lefebvre, S. Clean Color: Improving Multi-filament 3D Prints. *Computer Graphics Forum*, 33, 2, pp. 469-478, 2014.
- [24] Luo, L., Baran, I., Rusinkiewicz, S. and Matusik, W. Chopper: Partitioning Models into 3D-printable Parts. *ACM Trans. Graph.*, 31, 6, Article 129, 2012.
- [25] Vanek, J., Galicia, J. A. G., Benes, B., Mech, R., Carr N., Stava, O. and Miller, G. S. Packmerger: A 3D Print Volume Optimizer. *Computer Graphics Forum*, 33, 6, pp. 322-332, 2014.
- [26] Attene, M. Shapes In a Box: Disassembling 3D Objects for Efficient Packing and Fabrication. *Computer Graphics Forum*, 34, 8, pp. 64-76, 2015.
- [27] Chen, X., Zhang, H., Lin, J., Hu, R., Lu, L., Huang, Q., Benes, B., Cohen-Or, D. and Chen B. Dapper: Decompose-and-Pack for 3D Printing. *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH ASIA)*, 34, 6, Article 213, 2015.
- [28] Yao, M., Chen, Z., Luo, L., Wang, R. and Wang, H. Level-set-based Partitioning and Packing Optimization of a Printable Model. *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH ASIA)*, 34, 6, Article 214, 2015.

(2016年2月2日受付, 8月9日再受付)

著者紹介

高橋 治輝



明治大学理工学部情報科学科卒業。同大学大学院理工学研究科新領域創造専攻デジタルコンテンツ系博士前期課程修了。2015年度より同大学大学院博士後期課程に在籍するとともに理工学部助手、現在に至る。

宮下 芳明 (正会員)



千葉大学工学部卒業(画像工学)、富山大学大学院で音楽教育(作曲)を専攻、北陸先端科学技術大学院大学にて博士号(知識科学)取得、優秀修了者賞。2007年度より明治大学理工学部に着任。2009年度より准教授。2013年度より同大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科所属。2014年10月より教授、現在に至る。ヒューマンインタフェース学会、日本ソフトウェア科学会、情報処理学会、ACM各会員。