

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

高橋 治輝*¹ 宮下 芳明*¹

Redesigning the Pause Command Subject to Monitoring and Intervention in Printing Process of Fused Deposition Modeling

Haruki Takahashi*¹ and Homei Miyashita*¹

Abstract – Fused deposition modeling (FDM) 3D printers basically have a function that can “pause” printing process. By using this function, users can monitor the situation of the process and intervene in the printing process. However, the behavior of a 3D printer after receiving a pause command is not designed well, if anything, this pause function even causes quality degradation. In this paper, we investigate the pause function and the behavior of four 3D printers, and present requirements how to stably pause printing process; fast response to the pause command, pause after printing one layer, and stable pause and resume printing. To meet these requirements, we implement a system that utilizes the way of communication of an FDM 3D printer. We demonstrate how the pause makes printing process efficient and what expression can be available with the pause. Finally, we discuss the pause in the printing process of FDM 3D printers.

Keywords : 3D printer, FDM, digital fabrication, pause, printing technique

1. はじめに

3D プリンタやレーザカッターをはじめとするデジタル工作機器の普及により、パーソナル・ファブリケーションと呼ばれる個人レベルのものづくり環境が整ってきている。本研究では、3D プリンタの製造方式のひとつである熱溶解積層方式を取り上げる。この方式は、溶解させたプラスチック樹脂をノズルから押し出し、プラットフォーム上に積層することで立体形状を作り上げる。扱いの容易さ、樹脂の種類、ランニングコストなどの点において優位性があり、一般ユーザでも比較的手軽に利用できることが特徴である。造形精度や制御方法に関する研究は広く行われており^{[1][2]}、近年では、造形速度の性能限界なども明らかになってきた^[3]。高コストな他方式に精度・速度の面で劣っているのが現状であり、性能や弱点を改善するだけでなく、この方式ならではの利点を活かした環境、システムを提供していくことが重要であるといえる。

熱溶解積層方式 3D プリンタの性能を活用して、十分な精度の造形物を安価に得るためには、造形中に発生する問題の観察とそれに基づいたパラメータ調整が必要になる。こうした造形の観察を可能とする機能として、多くの 3D プリンタは「造形の一時停止」を搭載している。この命令を受け取った 3D プリンタは、樹脂の押し出しを中断し、ユーザに造形の具合や断面

形状の様子を確認させるように振る舞う。再開命令を受け取り次第、停止した位置から造形を続行する、という馴染みのある機能である。近年では、造形を一時停止させた後に、造形対象に変更を加える^[7]、内部にオブジェクトを挿入する^[8]など、ユーザを造形工程に介入させるものづくり環境も提案されている。

しかしながら、現状の一時停止は造形中止のためだけに使用される、あるいはほとんど使用されない機能となっている。なぜなら、一時停止命令を送信することで造形の品質低下を招くさまざまなリスクが生じるためである。例えば、溶解した樹脂は停止中もノズルの先端から溢れてしまうことが知られており、造形物に付着すると樹脂の膨らみが作られて品質が低下する。また、3D プリンタの仕様上、一時停止命令に即座に反応しない場合もあり、不適切な位置での一時停止・再開によって構造に切れ目が生じたり、観察対象部分の造形が完了してしまった後に一時停止する、などの状況も起こり得る。3D プリンタの扱いに慣れたユーザの中には「一時停止をしないほうが安定する」という認識をもっている人が少なくない。

一方で、3D プリンタが対象とする 3D モデルの種類は多岐に渡り、いくら高精度な熱溶解積層方式 3D プリンタであったとしても、造形対象に応じたパラメータ調整や造形エラーへの対応が必要である。センサや画像処理を用いた造形のモニタリングは、こういった状況を解決する実用的な手段であり、数時間から数十時間に及ぶこともある造形を、効果的に観察すること

*1: 明治大学大学院先端数理科学研究科

*1: Graduate School of Advanced Mathematical Sciences, Meiji University

を可能とする。ユーザが造形に関わらなくても良いように、あらゆることを自動で解決できるような方向を目指して進化していると言えるだろう。

我々は、造形のパラメータとその結果作り出される造形物との関係や3Dプリンタのふるまいを理解することで、初めて3Dプリンタを自由に使いこなすことができると考えている。そのためには、可能な限り造形を観察し、造形している3Dプリンタや造形物からフィードバックを得ることが重要である。さらに、3Dプリンタを一時的に停止させることで、造形の様子を確認し、3Dモデルや3Dプリンタの特徴を知ることができる。多くの3Dプリンタが事前に一時停止命令を挿入できる機能を備え、LCDやGUIに「一時停止ボタン」を搭載しているが、この機能はパラメータが造形にどう影響したのかなどを把握するための試行錯誤に活用可能である。一時停止をこうした目的で活用するためには、現在の「とにかく一時的に止められれば良い」という一時停止機能を再検討する必要がある。

本論文では、「造形の一時停止」は熱溶解積層方式3Dプリンタの重要な機能のひとつである、という立場に立ち、造形の観察や造形への介入を前提としたときに、この機能をどうデザインすべきかを議論する。まず、商用の熱溶解積層方式3Dプリンタ4台の挙動を調査し、現状の一時停止機能の仕様や不十分な点を明らかにする。そして、調査結果に基づいて理想的な一時停止機能の要件をまとめ、要件を満たすRepRapベースの3Dプリンタのためのホストアプリケーションとして実装する。システムは、3Dプリンタの内部処理の仕組みを応用しており、制御命令(Gcode)を事前に処理することで、一時停止命令への高速な反応、1層分のレイヤを作り終えてからの停止、造形物の観察を可能にする挙動と樹脂の溢れ防止を搭載している。また、この一時停止を用いた造形の効率化として、造形中にパラメータを変更する仕組み、樹脂の変更について述べる。さらに、造形に介入することで実現する手法として、造形断面への着色と接着具合の変更、既存研究の造形手法の適用、動的なサポート構造の挿入について実例とともに紹介する。

2. 関連研究

本研究の関連研究として、一時停止を用いた造形・表現手法、3Dプリンタの観察・モニタリングに関する研究、インタラクティブ・ファブリケーション、そして熱溶解積層方式の造形手法について述べる。

2.1 一時停止を用いた造形手法

造形中に人間が介入して造形物に手を加えるために一時停止が活用されている。Encore^[7]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。リング状の部分を通すように造形を行う手法(Print-through)では、造形の一時停止とオブジェクトの挿入を組み合わせている。この手法では、Repetier-host¹のエディタで@pause命令を事前に入れておくことで一時停止命令を送信している。3D Folded PrintGami^[8]は、紙で組み上げた電子回路を造形物の中に挿入することで、インタラクティブな造形物を作り出すことを可能にした。この手法では、穴の空いたモデルを事前にデザインし、造形中にGcodeのG4命令(指定した時間だけ停止)を呼ぶように記述しておくことで、造形中のオブジェクト挿入を実現している。また、著者らは、一時停止の際に発生する樹脂の溢れを新たな表現として用いる造形手法^[9]を構築している。同様に、GcodeのG4命令を使用して、指定した箇所ですぐかな時間(100ms程度)だけ一時停止することで樹脂の溢れを制御し、壁面に模様や文字を描き出すことを可能とした。

これらの手法に共通していることは、いずれも造形の前段階でデザインを確定させて、停止位置や時間を確定しておく必要があるということである。本研究では、事前に計画された停止だけでなく、造形に応じて停止させるような状況も対象としている。

2.2 3Dプリンタのモニタリング

熱溶解積層方式3Dプリンタでは、設定や環境によってはしばしば造形エラーが発生し、樹脂の浪費^[4]や製造の長時間化を招く。そのため、3Dプリンタのためのトラブルシューティングガイド^[5]などを参考にして、造形エラーの発見や設定の調整を行う必要がある。

この問題に対応するために重要な工程が、造形のモニタリング^[6]である。Robersonは、造形エラーの発生箇所を造形物の外部・内部に分類し、3Dプリンタにセンサを取り付けて正しく造形が行われているかどうかをチェックする手法^[10]を提案している。もし造形中に問題が発生した場合、センサはその問題に応じた異常値を観測するため、これらを事前に調査しておくことで問題の分類をするという仕組みである。センサの種類や注目する問題によって、さまざまな手法が提案されており、造形中の断面を撮影して本来のCADモデルの断面と比較する手法^[11]、プラットフォームおよびフレームに加速度センサを取り付けて樹脂の押し出し状況をモニタリングする手法^[12]、造形中に生じる音波(Acoustic Emission)を観測する手法^[13]なども提案されている。

これらの手法は、問題の検出・修正を全自動で行うことを目的としており、長時間の造形を監視する際に実用的である。しかし、これらで検出できる問題は、

1: <https://www.repetier.com/>

センサが観測できるものに限られるため、ユーザの直接確認やそのための仕組みも別途必要である。一時停止は、このモニタリングにも有用であり、積層・内部構造の様子をユーザに見せることを可能とする。

2.3 インタラクティブ・ファブリケーション

3D プリンタの造形時間がユーザにとっての待機時間となっているように、ツールの発展の一方で、ユーザと造形物との間には隔たりが生まれている。Willis らは、この指摘と伝統的なものづくりにおけるインタラクションの復権を目標として、インタラクティブ・ファブリケーションというものづくり環境を提案した^[14]。この環境では、ツールを介することで、造形物や樹脂とリアルタイムに、直接的にインタラクションできることを強調している。Interactive Construction^[15]は、レーザカッターを用いたインタラクティブ・ファブリケーションシステムである。ユーザはレーザカッター内部に設置された材料に対して、レーザポインタで移動経路を直接指示することができる。著者らは、インタラクティブ・ファブリケーションの考え方を熱溶解積層方式と 3D モデリングに応用したものづくり環境^[16]を提案している。ユーザは造形中であっても未造形部分のモデリングを行うことができ、造形の様子を考慮しながら未造形部分のデザインを変更できる。

さらに、3D プリンタ自体を改良することによって、造形工程は大きく変容する。On-the-fly Print^[17]は、3D モデリングと造形を統合し、スクリーン上での編集を逐次的にプレビューできるようにした。高速化のためのワイヤフレーム造形^[18]や 5 軸の自由度をもったエクストルーダ、不要な部分を取り除くためのカッターなどを搭載している。Patching Physical Objects^[19]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。これらを組み合わせることで、造形物の部分的な作り直しや修復など、新しい造形工程を可能にした。

前節でも述べたように、一時停止機能はユーザが造形工程へ介入することを可能とする。一時停止がうまく機能すれば、3D プリンタとユーザとが造形物に交互に手を加えていくようなインタラクティブなものづくり環境への貢献にもなるだろう。

2.4 熱溶解積層方式 3D プリンタの造形手法

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^[21]。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高速化を実現する一連の手法^[20]のひとつとして、ワイヤフレームモデルとして造形する高速化手法^[18]を提案している。著者らは、3D プリンタで動物のような毛並みなどの質感を表現するこ

とを目標とした造形手法^[22]を提案している。この手法では、造形時のエクストルーダの高さ位置や樹脂の押し出し量を通常では利用されないような範囲にまでに拡張し、樹脂の振る舞いによって生み出される構造を利用した。Kanada は、3D プリンタを用いたジェネラティブアートの造形^[23]を試みている。螺旋状に樹脂を積み上げていく造形工程と樹脂量による反射光の制御を実現している。Reiner らは、2色造形を活用して色調変化を表現する手法^[24]を提案している。一定の周期で揺らした外壁を、異なる色で互い違いに積層していくことで、表面に見える部分の色調を制御する。Kuipers らは、この色調表現をより高精細に行うために、ハッチングを用いる手法^[25]を構築した。熱溶解積層方式が作り出す 1 本の線状構造の太さを制御して、造形物の表面でハーフトーンのような色調表現を行うことを可能とした。

熱溶解積層方式は他方式に比べて容易に扱えるため、このようなさまざまな造形手法が提案されている。しかし、いずれも造形前の段階でパラメータやデザインを確定しておく必要がある。造形の一時的停止は、こういった熱溶解積層方式の柔軟性を拡張するために重要な機能になると考えている。

3. 一時停止の調査と理想的な停止のための要件

現在普及している熱溶解積層方式 3D プリンタにおいて、一時停止がどのような挙動をするかを調査する。この結果にもとづいて、一時停止機能についての要件をまとめる。

3.1 一時停止機能の調査

ここでは、実際に 4 台の商用 3D プリンタに一時停止命令を送信して、その挙動や発生する問題を調査する。対象とする 3D プリンタは、Makerbot Replicator 2X²、Zortrax M200³、XYZprinting da Vinci Jr. 2.0 Mix⁴、Ninjabot NJB-200⁵であり、各社が提供するソフトウェア、あるいは 3D プリンタに搭載されている LCD を操作して一時停止を行った。なお、Ninjabot NJB-200 はオープンソースの RepRap プロジェクトをベースとした 3D プリンタであり、様々なホストアプリケーションで制御することができる。

これら 4 台は、いずれも有名な 3D プリンタメーカーから販売されており、低価格帯の熱溶解積層方式 3D プリンタを代表するものである。また、各メーカーからはさまざまタイプの 3D プリンタが販売されているが、著者らのラボにて利用可能であったものを調査対象とした。調査結果にて詳述するが、一時停止命令

2: <https://www.makerbot.com/>

3: <https://zortrax.com/>

4: <https://jp.xyzprinting.com/>

5: <http://ninjabot.jp/>

に対して、3Dプリンタごとに異なる反応を示しており、比較検討するには十分な種類と台数である。なお、メーカーやマシンごとの一時停止命令の処理の仕方について比較・分析するための選出であり、3Dプリンタごとの精度差やハードウェアの差は考慮しない。

一時停止命令を送信する状況は、「1辺が50mmの立方体の造形中」とし、開始から数レイヤだけ造形が完了した後一時停止命令を送信した。また、3Dプリンタが完全に停止したことを確認したのち、造形を再開させた。以降、それぞれの3Dプリンタの挙動を説明する。

3.1.1 Makerbot Replicator 2X

LCDの隣の十字ボタンを操作して画面上の「Pause」を選択して一時停止命令を送信する。命令を受け取った3Dプリンタは即座に造形を停止してその場にどまる。同様に、造形再開も即座に反映される。

また、Replicator 2XにはZ pause heightという設定も用意されており、事前に一時停止する位置をミリメートル単位で指定することができる。この設定が有効かつ造形位置がZ pause heightに達したとき、3Dプリンタは造形を一時停止し、XY軸のホームポジション（初期位置で3Dプリンタの手前側の隅）へとエクストルーダを移動させる。この機能は樹脂の交換（例えば、色の変更^[26]）を可能にするもので、直後のLCDにはフィラメントをロード、アンロードするためのコマンドが表示される。

3.1.2 Zortrax M200

LCDの隣にあるツマミを一定時間以上押し込むことで一時停止命令を送信する。この押し込み時間には多少のばらつきがあり、3, 4秒程度押し続ける必要がある。命令を受け取った3Dプリンタは、短いブザー音を鳴らすことでフィードバックを返すが、しばらくの間は造形が続く。3Dプリンタが停止するまでの時間にもばらつきがあり、ブザーの直後から十数回の移動を経たあとに停止することが確認された。一時停止時は、まずエクストルーダをZ軸方向に浮かせて、次にX軸とY軸のホームポジションに移動するという挙動をとる。また、停止中にはノズルからの樹脂の溢れ、再開後の造形部分には樹脂の不足が目立った。

3.1.3 XYZprinting da Vinci Jr. 2.0 Mix

LCDの隣の十字ボタンを操作して画面上の「チュウダンスル」を選択して一時停止命令を送信する。命令を受け取った3Dプリンタは、一瞬だけその場で停止する。その後、即座に停止せずにしばらくの間は造形が続く（Zortrax M200と同様の挙動）。一時停止時は、X軸方向のホームポジションに移動するのみであるが、再開後に目立った樹脂の不足はなく、比較的安定して再開することができていた。

3.1.4 Ninjabot NJB-200

Repetier-hostのGUIとして用意されている一時停止ボタンを用いて一時停止命令を送信する。命令を受け取った3Dプリンタは、十数回の移動を経た後にその場で停止した。造形再開は即座に反映される。

なお、Repetier-hostでは、Gcodeの中に「@pause」と命令を入れておくことで、事前に一時停止の命令を仕込むことができる。また、一時停止している状態から、GUIのプリンタ制御ボタンを使って、手でエクストルーダの位置を移動することができる。

3.2 調査結果および分析

調査結果から、一時停止に関する挙動には統一された仕様がなく、3Dプリンタやソフトウェアごとに独自の動作が実装されていることがわかった。ここではこの結果を、一時停止命令を受け取ったあとの反応、停止・再開時の動きの点から整理する。

3.2.1 一時停止命令への反応

Replicator 2X以外の3Dプリンタでは、停止命令を受け取った後に数回の移動が発生した。停止までの時間にはばらつきがあったが、移動回数はほぼ一定で、da Vinci Jr. 2.0 MixとZortrax M200の造形の様子を撮影した映像からは、停止までに7, 8回の移動があることが確認された。3Dプリンタは、造形のための移動命令を順次読み込んでいくことで造形を行うが、この一時停止までの反応をみると、通常造形の命令の中に一時停止命令を追加して、同等の命令として順次読み込んでいく仕様になっていると考えられる。実際に、熱溶解積層方式の3Dプリンタは、命令をスムーズに読み込んでいくためのリングバッファを搭載しており⁶、送信された命令をいくつか保持しておける仕組みになっている。つまり、停止までの挙動は、一時停止命令が読み込まれるまでに処理される命令によって決まる。停止までに7, 8回の移動があったが、このときプリンタは立方体の内部を塗りつぶすような造形を行っており、実際の命令の数はおよそ倍の14~16回程度になると考えられる（塗りつぶしの往復移動の際に“コ”の字を描くような短い移動が入るため）。

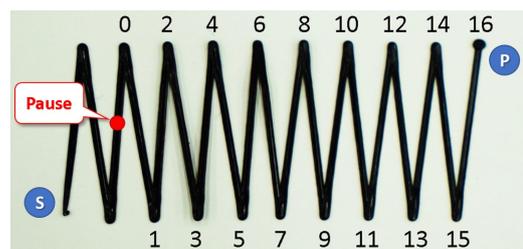


図1 一時停止命令の送信と実際の停止位置。

6: <http://reprap.org/wiki/G-code#Buffering>

ここで、Ninjabot NJB-200 に図 1 のようなパス（1 つの直線が 1 つの移動命令に対応）を低速で造形させてこの現象を確認する。造形中に、開始地点（図 1 中の位置 S）から 3 本目の中ほどで一時停止命令を送信する。この時、3D プリンタは図 1 中の 0 番へ向かって移動していることから、この位置への移動命令が現在造形に反映されている命令である。一時停止は、3D プリンタに格納されている移動命令の次に追加されるはずであり、実際に、16 個目の命令を読み終えたあとで停止した。停止箇所（図 1 中の位置 P）には、溢れた樹脂の膨らみが確認できる。つまり、この 3D プリンタは常に 16 個の命令を保持することができ、一時停止命令はそのあとに挿入、すべての移動を終えたあとに反映された、ということがわかる。3D プリンタごとにバッファサイズは異なる可能性があるが、こういった造形を滑らかに行う仕組みがあり、それによって一時停止命令の反映までに時間がかかっている、という理解が重要である。例えば、停止させたいと思った瞬間に命令を送信したとしても、その前に数回の移動が入り、確認しなかった層の一つ上に造形が進んだあとに停止する状況が起こりうる。また、造形するパスの長さ、造形速度によって停止までの時間が異なることになり、短いパスを高速造形しているときは急停止するが、長いパスを低速造形しているときはなかなか停止しない、という状況を招くことになる。

具体例として、図 1 の各辺が 1 mm で 3D プリンタが 30 mm/s で造形を行っているとしよう。このとき、一時停止命令を受け取ってから実際に図 1 の位置 P で停止するまでに約 0.5 秒を要することとなる。一方で、図 1 の各辺が 100 mm で同じ速度で造形していたとすると、実際に停止するまでは約 53.3 秒となる。3D プリンタの造形可能サイズは 150 mm から 200 mm 程度が一般的であることから、3D モデルのサイズや造形している箇所によって停止までにかかなりの時間差が生まれることが想定される。

3.2.2 停止・再開時の動き

停止直前のエクストルーダの移動として、その場で停止するかプラットフォームの脇に逃がすかの 2 パターンが見られた。その場で停止した 3D プリンタは、Replicator 2X と Ninjabot NJB-200 であり、ノズル付近の造形箇所は停止中でも熱され続けていた。造形が完了した部分は、緩やかに冷却されることが望ましく、一時停止を行う場合はノズルを造形部から離すことが必要である。この逃がす動作を搭載した 3D プリンタは、da Vinci Jr. 2.0 Mix と Zortrax M200 であったが、前者は X 軸方向に移動するのみ、後者はホームポジション（3D プリンタの手前側）に移動するという動作になっていた。ノズルを離すことで待機中に

造形物が熱されることを回避しているが、一時停止を造形の確認のために用いるという状況を考えれば、エクストルーダはプラットフォームの奥側に逃がすとより良い。また、この移動は樹脂の押し出しを伴わず、極めて高速にエクストルーダを動かすことができるため、増加する造形時間はごく僅かである。

停止中の 3D プリンタは温度維持以外の動作を行わないが、ノズル内の圧力によって樹脂は溢れ続けることがある。この溢れた樹脂が造形物に付着すると、造形部分の変形や品質低下を招くことになる。例えば、Ninjabot NJB-200 では、樹脂の溢れによる膨らみが観察できる（図 1 中の位置 P）。この問題を軽減する仕組みが、樹脂の引き戻し（Retraction）である。ノズル内の圧力を下げておくことで、停止中の樹脂の溢れを防ぎ、造形を再開する際に引き戻した分だけ追加押し出しをして、ノズル内の状態を調整するというものになっている。da Vinci Jr. 2.0 Mix はこの引き戻し、追加押し出しがうまくデザインされているようで、停止・再開位置での品質低下が目立たなかった。一方で、Zortrax M200 では停止中の樹脂の溢れ、造形再開後の樹脂不足が顕著に見られた。このような問題を防ぐために、引き戻し・追加押し出しを行うだけでなく、一時停止する位置を適切に決める必要がある。例えば、滑らかな面を造形している最中に停止すると、停止による切れ目が生じてしまう。

3.3 理想的な一時停止の要件

以上の結果を踏まえると、3D プリンタのための一時停止には、命令への応答と安定した停止方法の両立が重要であることがわかる。そこで、本研究では一時停止の要件として 3 つの仕組み・動作を提示する。

1. 一時停止命令に即座に反応する 命令を受け取った 3D プリンタが、その停止命令あるいは停止の準備のための命令群を速やかに読み込めるような仕組みが必要である。これは、その場で即座に停止させるという動作ではなく、命令に対する反応を高速に行えるように動作させるべきだ、という意味である。

2. レイヤの造形途中で停止させない 一時停止によって、樹脂の溢れ、造形パス間の切れ目が生じるため、停止位置は注意深く決定されるべきである。本研究では、この停止のタイミングをレイヤ単位とする。つまり、一時停止命令を受け取っても、必ず現在のレイヤは完成させ、その直後に停止するという動作をさせる。要件 1 と矛盾するように聞こえるが、前項は命令に対する反応速度であり、例えば、あるレイヤの造形終了間際に命令を送信したとしても、次のレイヤには進行せずに造形が一時停止する仕組みのことを指す。

3. 停止、再開時のエラーを低減し、造形状況を確認可能にする 停止中に発生し得るエラーを軽減する

ために、樹脂の引き戻しと追加押し出しを行う。また、ユーザに造形の確認や介入を容易に行わせるため、エクストルーダは一般的なホームポジションの逆側であるプラットフォームの奥に逃がす。造形結果に悪影響を与えないため、ユーザは気軽に停止させて造形の様子を確認することができる、という一時停止を目指す。

4. システム

前述の要件を満たした一時停止によって、どのような造形工程が実現するかを示すため、提案手法を3Dプリンタ制御用のホストアプリケーションとして実装した。システムはProcessing 3xを使用して実装されており、RepRapプロジェクトベースの3Dプリンタ(ここではNinjabot NJB-200)で動作する。システムは、通常の造形に必要な最低限のGUIと造形対象のプレビュー画面、造形に関する情報を表示するログ画面からなる(図2)。一時停止は、GUIのボタンの一つとして実装した。

4.1 システム概要と利用の流れ

まず、システムは、シリアル通信を利用して3Dプリンタと制御用PCとを接続する。ユーザは、事前に3Dプリンタとの接続のためのポート番号やその3Dプリンタの造形可能サイズ、樹脂の引き戻し量を入力し、システムをその3Dプリンタに対応させるための設定を行う。そして、メニュー内のボタンを操作することで、STL形式の3Dモデルを読み込んで外部プログラムとして連携されているスライサを呼び出す(連携と処理の容易さを優先して、CuraEngineを使用)。スライサは3DモデルをGcodeへと変換し、その結果をシステム側に返す。システムは、得られたGcodeに応答の高速化(4.2.1)のための処理を施し、Gcodeの構造を管理するためのデータ構造に格納する(4.2.2)。このGcodeを3Dプリンタへ順次送信することで造形を行う。

ユーザは、造形中にGUIのボタンを押すことで一時停止命令を送信できる。一時停止命令を受け取った

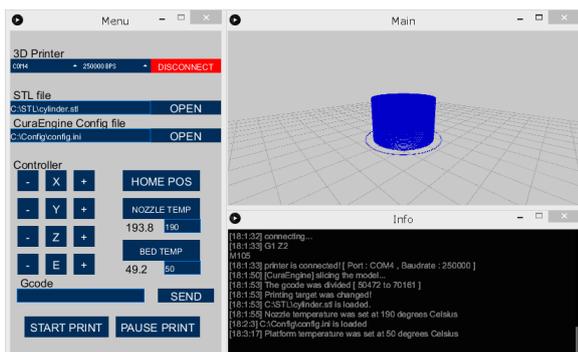


図2 システムの概観。

3Dプリンタは、安定した一時停止のために現在造形中のレイヤを完成させる。その後、一時停止のために最適化されたGcodeを読み込み(4.2.3)、エクストルーダをプラットフォームの奥側に寄せ、樹脂の溢れ防止のための引き戻しを行う。このとき、画面上の一時停止ボタンの表示は「造形再開」に変更される。ユーザは、一時停止中に造形の確認や修正、造形への介入(5章で後述)を行ったのち、造形を再開する。

4.2 一時停止の要件を満たすための仕組み

一時停止の要件を満たすため、システムに3つの仕組みを搭載した。いずれも、Gcodeの処理と管理方法によるものでソフトウェア上での処理で完結している。

4.2.1 Gcodeの分割による反応の高速化

多くの3Dプリンタは一時停止命令を送信しても即座には停止せずに、ある程度の移動を行っていた。また、これは3Dプリンタが自身のバッファに格納できる命令数によるものであり、造形しているパスによっては、命令への高速な反応が困難であることがわかった。本システムでは、この要件を満たすため、移動命令を細かく分割して意図的に3Dプリンタのバッファを埋めるという方法を試みる。

このときの3Dプリンタの様子を図3で説明する。ここでは、3Dプリンタが命令を5つだけ格納できるバッファを持っており、図1と同様にジグザグなパスを造形していると仮定しよう。通常であれば、一時停止命令を受け取ったプリンタは、その命令を新しくバッファに追加し、5つのパスを造形したのちに停止する(図3上部)。ここで、各パスの長さを3分割した場合の状況を考える(図3下部)。一時停止命令は、同様に5つの移動命令後に挿入されるが、移動命令が分割されたことによって、分割前の2つ目の移動中に一時停止されることになる。このように、Gcodeを細かく分割して高速に読み込ませていくことで、新しい命令に即座に反応できるようになる。

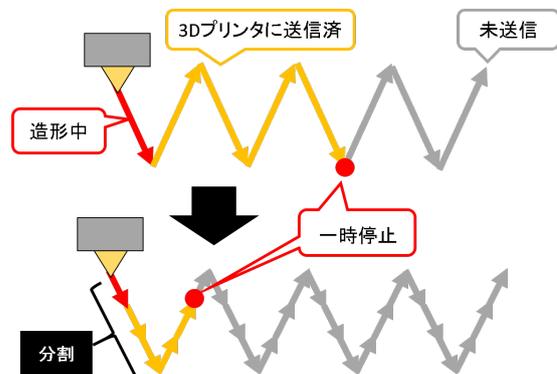


図3 Gcodeの分割による反応の高速化の仕組み(3Dプリンタが5つの命令をバッファできると仮定)。

この分割が造形プロセスに与える影響として、まず造形品質への影響が考えられる。しかし、3D プリンタがなめらかな曲線（球体や円柱など）を造形するときは、そもそも極めて短いパスを高速に読み取っており、実際に、分割によって品質が低下するような状況は観察されていない。もうひとつは、Gcode のデータの膨大化である。Gcode は 1 つの命令を文字列として扱うため、一般的にデータ量が多いファイル形式である。分割処理をファイルのレベルで施してしまうと、その Gcode 自体が扱いづらくなる恐れがある。本システムでは、この分割処理を Gcode の送信の直前にレイヤ単位で施し、オリジナルの Gcode には手を加えないようにしている。分割具合は適宜調整することが可能であるが、現在のシステムでは、1 つのパスを 0.1~0.2 mm 程度の細かさに分割するようにしている。仮に 3D プリンタが 16 個の命令を保持できるとすると、この分割によって、一時停止命令を受け取ってから 1.6~3.2 mm の移動以内に停止処理を開始することができることを意味する。

4.2.2 Gcode を管理するためのデータ構造

Gcode の構造は、モデル全体、各レイヤ、1 回の命令（単純な移動やパラメータ変更の命令も含む）という関係で説明することができる。この構造は Gcode 内に明示されていないが、1 回の命令は各行から、1 枚のレイヤはエクストルーダを Z 方向に移動する命令から抽出することができる。

システムはこれらを明確なデータ構造として扱って、3D プリンタへの命令送信や処理のために利用する。このときのデータ構造を図 4 に示す。システムは、与えられた Gcode をスタートコード（開始処理、加熱やエ

クストルーダの初期位置の設定など）、メインコード、エンドコード（終了処理、冷却やエクストルーダの移動など）に分ける。造形対象を意味するメインコードは、複数のレイヤから構成されるため、これらをそれぞれひとつのまとまりとして管理する。これにより、システムは Gcode 単位、レイヤ単位で造形を管理することが可能になる。例えば、一時停止命令を受け取った際に、現在造形中のレイヤで処理を一時停止するという処理はレイヤ単位で、前述の Gcode の分割やパラメータの調整など処理は Gcode 単位で行う。

なお、CuraEngine の出力する Gcode は一枚のレイヤのより詳細な構造を持っており、壁面、内部構造、サポート構造など、どこを造形しているかという状況も詳細に取ることができる。本研究では、レイヤ単位で一時停止するような要件を設けたが、少なくとも外壁の造形時は停止させない、などの異なる条件を与えることも可能であると考えている。

また、レイヤには新しく Gcode を追加する・削除するという処理も可能である。次項で述べる樹脂の引き戻し、エクストルーダをプラットフォームの脇に移動する、という動作はこの仕組みを利用して実現する。

4.2.3 一時停止・造形再開処理

一時停止を行う際は、エクストルーダを移動させ、樹脂の溢れや不足、造形物への影響を極力少なくしなければならない。まず、樹脂を引き戻して、エクストルーダを逃がすため、一時停止ボタンが押されたレイヤの最後に、次の命令を追加する。

1. M83
2. G1 E-2
3. M82
4. G0 X200 Y200 F3600

1, 3 行目の M82 および M83 は、樹脂の押出量設定のためのパラメータであり、それぞれ、絶対値指定、相対値指定となっている。CuraEngine の場合、造形中の樹脂量は絶対値指定になっている（造形が進むごとに値が増えていく）ため、樹脂の引き戻しを行う際には相対値指定にする方が簡易である。実際に引き戻す処理は、2 行目とパラメータ E によって決まる。一般的なスライサでは、2~4 mm 程度引き戻すことで樹脂の溢れを防いでいるが、ここでは、2 mm だけ引き戻す設定とした。4 行目の G0 命令がエクストルーダの移動命令（G1 命令と同等）であり、X と Y は移動先の座標となる。3D プリンタのプラットフォームのサイズによって決まり、奥側の隅の座標を事前に与えるように設定している。この命令を送ったあと、システムは Gcode の送信を中断し、一時停止状態に入る。

造形再開時に送信すべき命令は停止時とほぼ同様である。まず、停止命令が処理された位置にエクスト

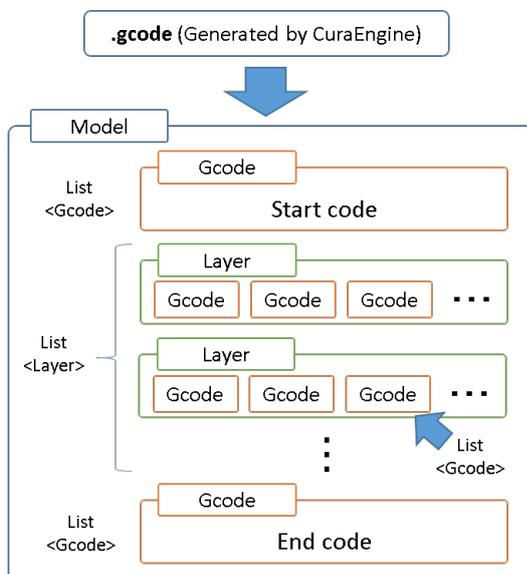


図 4 提案システム内の Gcode のデータ構造

ルータを戻す必要がある。システムは常に 3D プリ
ンタに送った最新の Gcode のパラメータ（座標）を記録
しており、停止命令が送られた際にはこれらを再開地
点として参照する。再開地点に戻り次第、引き戻した
分の樹脂を同様の方法で再び押し出し、樹脂の状態を
一時停止前に近い状態に戻す。最後に、樹脂の押し出
し座標 E と座標の指定方法を調整し、本来の Gcode
の呼び出しを再開する。

4.3 一時停止を活用するための追加機能

一時停止を有効活用し、造形の観察と介入を実現す
るために、いくつかの追加機能を実装した。

4.3.1 造形途中のパラメータ変更

安定した一時停止を行えることで、造形状況の監視
が実現する。本システムは、さらに一步進んで、造形中
にパラメータ修正を可能とする仕組みを搭載している。
システムは、外部のスライサとして CuraEngine と連
携させているが、CuraEngine の設定ファイル（パラ
メータが記述されているテキストファイル）を書き換
えて、再スライスをかけることで、造形対象の Gcode
を変更することができる。再スライスされた Gcode は、
4.2.2 で述べたデータ構造に同様に格納される。システ
ムは、データ構造に基づいて何番目のレイヤまで命令
を送信したかを監視しているため、変更された Gcode
の次のレイヤから造形を開始すれば新しいパラメータ
で造形を再開することができる。

例外的に処理しなければいけないのは、積層ピッチ
の変更である。もし積層ピッチをより細かく、あるい
は荒くした場合は、システム内のデータ構造には異なる
レイヤ枚数が与えられることになる。例えば、積層
ピッチが細かくなると、Gcode 中のレイヤの枚数が増
え、造形完了したレイヤの位置を覚えておくだけでは
造形位置との整合性が取れない。この場合は、再開前
に現在の Z 座標と次のレイヤの Z 座標を確認する。も
し、新しく設定された積層ピッチ以上の差がある場合、
そのレイヤを読み飛ばす、あるいは造形していないレ
イヤまで戻って造形を行う処理を挿入する。

4.3.2 一時停止命令後に造形を高速化

命令を受け取りのフィードバック、および即座に造
形への介入を実現するための仕組みとして、命令受け
取り後に造形を高速化する仕組み実装した。システム
は、一時停止ボタンが押され次第、造形中レイヤの残
りの Gcode の速度パラメータ F [mm/min] の値を変
更する。このときの速度変化は、3D プリントの押出
性能の限界を考慮して決定される必要があるが、現在
は、デフォルトの造形速度を 1800 mm/min、この高
速化によって 3 倍の速度に切り替えるようにしている。

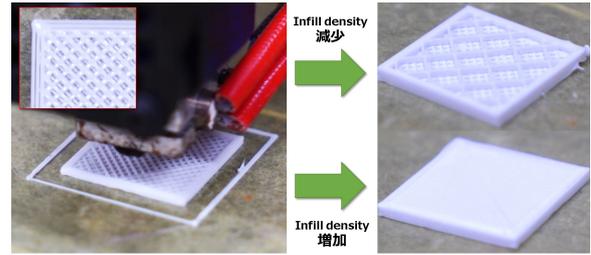


図5 造形中のパラメータ変更（内部密度）。



図6 造形中の樹脂変更。

4.3.3 レイヤを差し替える・意図的に飛ばす

システムは、4.3.1 で述べた積層ピッチの変更に対
応するとともに、意図的にレイヤを読み飛ばしたり、
異なる設定のレイヤに差し替えたりすることを可能と
する。これはレイヤごとに安定して一時停止できるこ
とのひとつの利点である。また、こういったシステム
内での処理にとどまらず、造形物に人間が直接手を加
えるなどの編集も可能になる。これらについては、次章
の利用例で詳細に述べる。

5. 提案する一時停止の利用方法

ここでは、本システムの利用例として、一時停止が
どのように機能するか、この一時停止によってどのよ
うな効率化が可能かについて述べる。また、造形が安
定して一時停止できることの利点として、造形途中の
レイヤに直接手を加える造形手法を紹介する。

5.1 造形の効率化

図5は造形中のパラメータ変更を示したものであり、
内部密度の増加、減少を造形中に制御した様子である。
具体例として、造形を一時停止して現在の様子を確認
したところ図5左のようにレイヤに細かな空洞ができ
ていることに気づいた、という状況を想定しよう。も
し、この造形をある期限内に終えなければならず、造
形物の強度よりも速く完成させることを優先したい場
合、ここから更に内部密度を減少させることで高速化
が実現できる。一方で、強度を優先したい場合は、逆
に内部密度を増加させることが可能である。従来、こ
のように造形時に発見した問題をパラメータ設定とし
て反映させる場合は、造形をはじめからやり直す必要
があった。

さらに、システムはレイヤごとに一時停止を行うこ
とができるため、パラメータに限らずに樹脂の変更も
行える。図6は円柱状の造形物を出力している最中



図7 断面への着色による接着具合の変更。せん断方向に力を加えることで容易に分割可能。



図8 造形中のレイヤ変更。(左) 3D printed hair [21]. (右) Expressive FDM [22].

に適宜一時停止を行い、樹脂の色を変更していく様子である。熱溶解積層方式でのカラー造形はさまざまなかたちで研究されており、多色造形を高品質に行う手法 [27] や、複数のエクストルーダを搭載した商用 3D プリンタ [7] も登場している。このように樹脂自体を取り替えてしまう方法は、従来の一時停止や Replicator 2X の Z pause height を使っても可能である。しかし、従来の方法で一時停止、樹脂の交換をしようとする、レイヤの造形途中で樹脂を切り替えることになってしまう。また、事前に一時停止を設定する方法の場合、樹脂交換の前の段階で戦略を立てておく必要がある。提案手法では、造形の様子を確認しながら、その場のアイデアや創造性を即座に反映させることができる。

5.2 一時停止を利用した造形手法

提案手法では、造形を安定して止められるだけでなく、ユーザに水平な断面を提供することができる。そのため、造形に介入してさまざまな表現を行うことが可能とする。例えば、レイヤ全体に着色することができる (図7左)。また、水性ペンで色を塗ると接着具合を変更できることが分かった。図7中に示すように、造形自体は安定して継続できるが、造形完了後にせん断方向に力を加えることで、容易に分割可能な造形物が出力できる (図7右)。例えば、内部構造を見せる、造形物を積み上げて出力後に分離する、といった利用方法から、内部に別の造形物を含んだケースの造形などにも応用可能である。

図8は、一時停止後の次のレイヤを変更することで、先行研究の表現手法を適用したものである。図8左

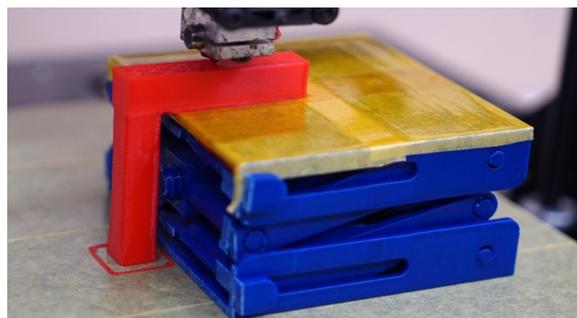


図9 サポート材の挿入

は 3D printed hair [21] の手法と樹脂の取り替えを組み合わせることで出力した造形物である。これを実現するために、提案システムに髪の毛のような構造を行う Gcode をテンプレートとして持たせた。システムは一時停止後に現在の最上面を確認し、毛構造の根本と伸ばす方向 (現在は、壁面の法線方向) を決定する。図8右は、Expressive FDM [22] のパラメータ設定を取り入れたもので、意図的にレイヤを飛ばすことで造形高さを制御している。そして、飛ばした分の高さから、ざらついた表面を出力できるような樹脂量を算出して、その分だけ樹脂を押し出せば良い。いずれの研究でも、こういった表現は造形前の段階でデザインしておく必要があったが、提案手法では一時停止を使用することで動的に適用することが可能である。

最後に、動的なサポートの挿入を行った例を図9に示す。ユーザは、造形の様子をプレビュー画面で確認しながら、オーバーハング (空中に突き出す部分) が現れるレイヤの直前で一時停止命令を送信する。サポート材の造形を行っていない場合、これ以上の造形はエラーとなってしまいが、提案手法ではこの停止中のタイミングにサポート材として代用可能なオブジェクトを挿入することが可能である。図9では、3D プリントしたジャッキ [8] を L 字の造形部分に挿入している (ジャッキ側には耐熱のためにカプトンテープを貼り付けた)。一般的なサポート材は、出力後に取り除かれ、そのまま廃棄されるため、樹脂使用量を減らす研究 [28] [29] や、サポート自体を減らす研究 [30] [31] [32] が盛んに行われている。提案手法は、サポートが必要になる前のレイヤで安定した一時停止が可能であるため、従来とは全く異なる方法でサポート材を付け加えるという造形方法が可能になると考えている。

6. 議論

本研究では、造形の一時停止命令の最適化に取り組んだが、依然として樹脂や 3D プリンタの性能に合わせた調整には課題が残る。まず、「樹脂の軟化点」が使

7: 例えば, Prusa i3 mk2. <http://www.prusaprinters.org/>

8: <https://www.thingiverse.com/thing:925556>

用する素材によって異なることがあげられる。熱溶解積層方式 3D プリンタの素材として一般的な PLA 樹脂や ABS 樹脂などは、フィラメントの引き戻しによってこれを軽減することができる。一方で、ウッドライク樹脂などの他の材料を混合した素材や、フレキシブル樹脂のように特定の性質を追究した素材は軟化点が低いことが多く、軟化による樹脂溢れが顕著になる。こういった状況の場合は樹脂溢れを防ぐこと自体が困難なことすらあり、あふれる樹脂を手作業で取り除く必要がある。また、特殊な樹脂に限らず、待機中に温度を維持し続けると、熱された樹脂が僅かずつ溢れてきてしまう。本研究の提案では、数十分のような長時間の停止を想定しておらず、一時停止とそこで行える観察・介入を対象としている。

こういった樹脂溢れをハードウェア的に解決した 3D プリンタも存在する。Stratasys⁹ uPrint Plus はノズルの先端を拭き取るためのブラシを搭載しており、造形に使用するノズルを切り替える際に擦り付けることで樹脂溢れを防止している。XYZprinting da Vinci 1.0 AiO は、プラットフォーム端にノズル先端に付着した樹脂を弾くためのゴム製のへらを搭載している。この上でエクストルーダを往復運動させることで、溢れた樹脂を拭き取ることができる。こうしたハードウェアの改良を組み合わせることで、一時停止による樹脂溢れをより効率的に解決することができるだろう。

うまくデザインされた一時停止は、ユーザを 3D プリンタに向き合わせる機会を提供することができる。まず、造形を気軽に停止させて良いため、造形の過程をユーザに「見せる」ことができる。特に、造形物の内部構造は完成後に確認することが困難であり、造形中の確認が必要である。さらに、一歩進んだインタラクションとして、その過程に介入させて造形中の問題や造形開始当初のデザインを「修正させる」ことができる。熱溶解積層方式 3D プリンタの造形速度や造形精度を考えると、こういった人間の介入を歓迎すべきである。なにより、造形過程を観察しながら発揮される創造力は、開始前の 3D モデリングやパラメータ調整とは全く異なるものであるはずだ。

3D プリンタはときに深刻な造形失敗を引き起こし、樹脂や時間の浪費を生んでしまう。しかし、著者らは、3D プリンタ使用時の最大の失敗は、こういった問題の原因を使用時に突き止められないことであると考えている。造形命令を出して待つだけで良い、帰宅して翌朝に確認すれば良い、といった利用方法が当たり前になっているが、可能な限り 3D プリンタに向き合って、その様子を観察すべきではないだろうか。また、問題

が生じそうであれば修正を試みる、次の造形に活かすための知見を得る、というユーザとしての努力も必要ではないだろうか。そして、造形中に新しいアイデアを閃いた場合は、即座に実践してみる、3D プリンタ側もそれを受け入れるような仕組みを搭載しているべきである。本研究では、一時停止という機能を切り口に、ユーザを造形工程に取り込む環境を目指した。

7. おわりに

本研究では、3D プリンタの造形の一時停止に着目し、3D プリンタの停止機能の調査、問題点と一時停止のための要件の整理を行い、より安定した一時停止の仕組みを提案した。ユーザは任意のタイミングで 3D プリンタを一時停止させて、造形の様子を観察できるだけでなく、その過程に介入して造形物を編集・修正することができる。これによって可能となる造形の効率化、新たな表現についての例を示し、一時停止機能、およびユーザと 3D プリンタとの向き合い方について議論を行った。

謝辞

本研究は、JST、COI の支援を受けたものである。

参考文献

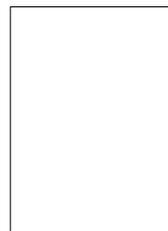
- [1] Turner, B. N., Strong, R. and Gold, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 20, No. 3, pp. 192-204, 2014.
- [2] Turner, B. N. and Gold, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21, No. 3, pp. 250-261, 2015.
- [3] Go, J., Schiffres, S. N., Stevens, A. G. and Hart, A. J. Rate limits of additive manufacturing by fused filament fabrication and guidelines for high-throughput system design. *Additive Manufacturing*, Articles in Press (Note to users), 2017.
- [4] Song, R. and Telenko, C. Material Waste of Commercial FDM Printers under Realistic Conditions. *Solid Freeform Fabrication 2016*, pp. 1217-1229, 2016.
- [5] Simplify3D. Print Quality Troubleshooting Guide. <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/> (2017 年 12 月 12 日確認)
- [6] Han, W., Jafari, M. A., Danforth, S. C. and Safari, A. Tool path-based deposition planning in fused deposition processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124, 2, pp. 237-246, 2002.
- [7] 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.
- [8] Roquet, C. D., Kim, J. and Yeh, T. 3D Folded PrintGami: Transforming Passive 3D Printed Ob-

- jects to Interactive by Inserted Paper Origami Circuits. In *Proc. of DIS'16*, pp. 187-191, 2016.
- [9] 高橋 治輝, 宮下 芳明. オーバーエクストルージョンを用いた熱溶解積層方式 3D プリンタのための造形手法. *芸術科学会論文誌*. Vol. 15, No. 5, pp. 194-207, 2016.
- [10] Roberson, D. M. Sensor-based Online Process Monitoring in Advanced Manufacturing. Master thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA. 2016.
- [11] Fang, T., Jafari, M. A., Danforth, S. C. and Safari, A. Signature analysis and defect detection in layered manufacturing of ceramic sensors and actuators. *Machine Vision and Applications*, 15, 2, pp. 63-75, 2003.
- [12] Bukkapatnam, S. and Clark, B. Dynamic modeling and monitoring of contour crafting: An extrusion-based layered manufacturing process, *Journal of manufacturing Science and Engineering*, 129, 1, pp. 135-142, 2007.
- [13] Wu, H., Wang, Y. and Yu, Z. In situ monitoring of FDM machine condition via acoustic emission. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84, 5, pp.1483-1495, 2016.
- [14] Willis, K. D. D., Xu, C., Wu, K.-J., Levin, G., and Gross, M. D. Interactive Fabrication: New Interfaces for Digital Fabrication. In *Proc. of TEI'11*, pp. 69-72, 2011.
- [15] Mueller, S., Lopes, P. and Baudisch, P. Interactive Construction: Interactive Fabrication of Functional Mechanical Devices. In *Proc. of UIST'12*, pp. 599-606, 2012.
- [16] Takahashi, H. and Miyashita, H. An Interactive Fabrication System that Allows Users to Edit a 3D Model during 3D Printing. *International Conference on Digital Fabrication 2016*, 2016.
- [17] Peng, H., Wu, R., Marschner, S. and Guimbretière, F. On-The-Fly Print: Incremental Printing While Modelling. In *Proc. of CHI'16*, pp. 887-896, 2016.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Takahashi, H. and Miyashita, H. Expressive Fused Deposition Modeling by Controlling Extruder Height and Extrusion Amount. In *Proc. of CHI'17*, pp. 5065-5074, 2017.
- [23] Kanada, Y. 3D printing of generative art using the assembly and deformation of direction-specified parts. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 22, No. 4, pp. 636-644, 2016.
- [24] Reiner, T., Carr, N., Měch, R., Št'ava, O., Dachsbacher, C. and Miller, G. Dual-color mixing for fused deposition modeling printers. *Computer Graphics Forum*. Vol. 33, No. 2, pp. 479-486, 2014.
- [25] Kuipers, T., Doubrovski, E. and Verlinden, J. 3D hatching: linear halftoning for dual extrusion fused deposition modeling. In *Proc. of SCF'17*, Article 2, 2017.
- [26] Dual-Color Printing on Makerbot Replicator 2 3D Printer. <http://3dprinting-blog.com/tag/z-pause-height/> (2017 年 12 月 12 日 確認)
- [27] Hergel, J. and Lefebvre, S. Clean Color: Improving Multi-filament 3D Prints. *Computer Graphics Forum*, 33, 2, pp. 469-478, 2014.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Dumas, J., Hergel, J. and Lefebvre, S. Bridging the Gap: Automated Steady Scaffoldings for 3D Printing. *ACM Trans. Graph.* 33, 4, Article 98, 2014.
- [31] 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.
- [32] 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.

(2017 年 7 月 1 日 受付, 10 月 6 日 再受付)

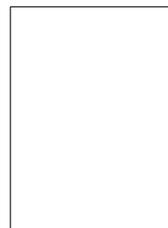
著者紹介

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, 2017 年度に同大学大学院先端数理科学研究科先端メディアサイエンス専攻に転科するとともに総合数理学部助手, 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。