

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

高橋治輝¹(非会員) 宮下芳明¹(正会員)

1 明治大学大学院理工学研究科

A New Printing Method for Fused Deposition Modeling 3D Printers using the Over-extrusion

Haruki Takahashi¹ Homei Miyashita¹

1 Graduate School of Science and Technology, Meiji University

haruki @ meiji.ac.jp homei @ homei.com

概要

熱溶解積層方式 3D プリンタには、意図しない部分に樹脂が溢れてしまう「オーバーエクストルージョン」という造形エラーが存在する。本稿では、このオーバーエクストルージョン現象の発生位置と溢れる樹脂の量を、停止命令の挿入とその時間によって制御し、造形に活用する手法を提案する。これにより、3D モデルの外壁に模様や文字を造形することを実現する。オーバーエクストルージョン現象は造形時に現れるため、提案手法には、従来のプリントプレビューでの表面の確認が不可能という特徴がある。予備実験により、適切なパラメータを調査するとともに、3D モデルへのドローイング操作で提案手法を活用できるデザインシステムを構築した。システムを用いて制作した作例を示し、オーバーエクストルージョンによる表現について議論する。

Abstract

We present a new 3D printing method using *Over-extrusion* that is one of the printing errors. The over-extrusion means that 3D printers extrude too much materials and result in excess materials that ruin the outer dimensions of printed objects. In this paper, we control this over-extrusion positions and amount of overflowing materials by instructing a temporary stop during printing. Our method allows user to print patterns and characters on an external wall of object using the over-extrusion. In addition, users cannot check the print preview so that this over-extrusion occurs during printing. We conduct preliminary experiments for setting suitable parameters and implement a designing system that allows users to create a design of the object surface by drawing operations. We demonstrate example objects and discuss the expression using the over-extrusion.

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。同時に、3D プリンタを制御するためのシステムやモデリングソフトウェアも進化しており、専門的な技術を持っていなくとも自由なデザインを行える環境が整ってきている。近年では、熱溶解積層方式 3D プリンタの普及と低価格化も進み、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 プリンタの新しい造形手法として、オーバーエクストルージョンを用いる手法を提案する。熱溶解積層方式の 3D プリンタは、ホットエンドの移動に合わせて樹脂を押し出していくことで造形を実現している。この移動の際、ホットエンドには常に樹脂押し出しのための圧力がかかっており、造形を中断したり、押し出す量の設定を誤ったりすると、必要以上の樹脂が溢れ出てきてしまう。これが「オーバーエクストルージョン」[1] と呼ばれる現象であり、避けるべき造形ミスであるとされている。提案手法では、3D プリンタの制御コードである Gcode を間接的に編集して、このオーバーエクストルージョン現象の発生と溢れ出す樹脂の量を制御する。これにより、外壁の任意の位置に膨らんだ部分を造形することが可能になり、模様や文字などの表面デザインに活用できる(図 1)。また、オーバーエクストルージョンは造形時に生じる現象であるため、提案手法を用いてデザインした表面は、従来のプレビュー機能で確認不可能という特徴がある。

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、オーバーエクストルージョンの発生方法と提案手法が実現する表現について述べる。4 章で、オーバーエクストルージョンによって得られる部分に関する予備実験について述べ、適切なパラメータを設定する。5 章で、提案手法を用いたデザインシステムについて述べ、6 章で造形例とデザイン方法を紹介する。そして、7 章で提案手法に関する議論を行い、8 章を本稿のまとめとする。なお、提案手法によって得られる造形物は 3D プリンタ環境や使用する樹脂に大きく依存する。そこで、本稿で使用した 3D プリンタや造形環境を付録としてまとめた。この情報は、提案手法の説明のために適宜参照する。

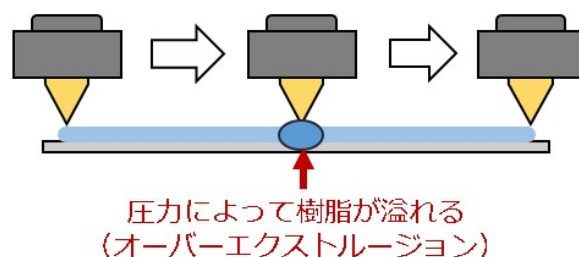


図 1: オーバーエクストルージョンを用いた造形

2 関連研究

本稿の関連研究として、3D プリンタの造形手法、造形物の表面デザイン、3D ドローイングに関する研究を取り上げ、提案手法の位置付けを明らかにする。

2.1 3D プリンタの造形手法に関する研究

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た造形手法[2]を提案している。この現象は、樹脂を押し出したままホットエンドを高速に動かすことで生じる一種の造形エラーである。これを制御すると髪の毛のように細い形状を造形することができる。また、WirePrint[3]では、3D モデルをワイヤーフレームモデルに変換して造形を行うことで高速化を実現している。提案システムとして改良を施した 3D プリンタを構築しているが、フォ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可能である。これらの研究は、安価な熱溶解積層方式の 3D プリンタに適用できるだけでなく、ハードウェアの増設が不要であるという特徴がある。

Patching Physical Objects[4]では、造形物を削り取るミリングマシンと回転す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。この3Dプリンタを用いて、造形物の作り直しや修復を実現する手法を提案しており、新しい造形工程を可能にしている。RevoMaker[5]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プリンタである。さまざまな角度から造形できるため、電子回路などを格納したモジュールを包み込むような造形が可能である。また、ホットエンドの移動に5軸の自由度を持たせた3Dプリンタ[6]なども登場しており、これを用いれば、表面を直接造形することも可能である。

本稿の提案手法は、Laputら[2]と同様に造形エラーを活用した造形手法であり、従来のプレビュー機能では確認できないという特徴がある。安価で広く普及している熱溶解積層方式3Dプリンタに適用することができ、ハードウェアの増設は不要である。

2.2 造形物の表面デザインに関する研究

造形物の表面は、その造形の品質が現れるだけでなく、触感やオリジナルのデザインを表現するための重要な部分である。そのため、造形後に表面を加工するツール[9][10]が開発されており、テクスチャの水圧転写[11]を試みる研究なども行われている。PaintRoller[13]のように、表面の凹凸を活用した作品なども見られる。

表面デザインの研究として、2Dのテクスチャ画像を使用して3D形状を作り出す手法がある。HapticPrint[12]は、造形物に触感を付加することを目的とした研究である。表面では2D画像に基づいた3D形状を作り出し、内部では構造を変化させて硬さや質量の分布をデザインすることができる。Dumasらはテクスチャの構造を解析して表面のデザインに応用する手法を提案している[14]。例えば、縞模様のテクスチャを適用すると、模様にあった空洞を造形物の表面にデザインすることが可能になる。さらに、この空洞は造形可能な形状に調整される。

また、3Dモデルを浮き彫りにしたようなデザインを造形するという手法も見られる。Appearance-Mimicking Surfaces[15]は、直立した壁の表面に3Dモデルを部分的に埋め込んだ造形物を作るための手法である。視点との組み合わせで、特定の位置から見たときにだけ正しく見えるような作品の制作を可能にしている。同様な手法として、画像の一部分を持ち上げた造形物であ

る「2.5Dモデル」も注目されている。Furferiらによって、画像から2.5Dモデルに変換する手法[16]が提案されており、Webサイト上で手軽に2.5Dモデルをデザインできるアプリケーションなども公開されている[17]。さらに、このモデルを用いて木版印刷のような転写を行うという試みもなされている[18]。

本稿の提案手法は、これらの研究と同様に表面のデザインに活用できるとともに、オーバーエクストルージョンにより膨らんだ2.5Dモデルという位置付けることができる。また、PaintRoller[13]やAppearance-Mimicking Surfaces[15]は主要な応用先と考えられる。これらについては、5章「造形例」で詳細に紹介する。

2.3 3D ドローイングに関する研究

3Dコンピュータ・グラフィックス技術の普及に伴い、3D形状の物体に対して手描き入力を行うタスクが要求されるようになった。テクスチャの描き込みやモデリング作業、ナビゲーションシステムなど、その要求は多様であるが、いずれのシステムでも2D入力での3Dのストロークを描くことが一般的である。そのため、ユーザはドローイングツールとカメラとを交互に操作していく必要がある。

こうした環境下でのカメラ操作を支援する研究としてHoverCam[19]がある。カメラの移動できる領域に制約を持たせることで、3Dの形状をなぞるようなカメラ操作を実現している。ドローイングの支援に関しては、LayerPaint[20]のように、3D形状の重なり具合を考慮した研究があげられる。LayerPaintでは、前面にあるレイヤではなく描画を行っているレイヤを優先するため、部分的に他の3D物体に隠れている場合でも連続してドローイングを行うことが可能である。これらの研究をもとに、OrtegaらはAutomated Camera Control Drawing (ACCD) [21]という手法を提案している。ユーザの操作に従うようにカメラを制御することで、あたかも2Dの平面上に入力を行うかのように3D形状への描画を可能にした。

提案手法を活用するためのデザインシステムでは、手描き入力によってGcodeへ停止命令を挿入する方法を採用している。これにより、Gcodeの編集をペイントソフトを扱うように行うことができる。また、この手描き入力時のカメラ制御は、ACCD[21]を参考に実装した。

3 提案手法

ここでは、オーバーエクストルージョン発生方法と、提案する制御方法について述べ、提案手法を活用することで実現する表現について述べる。

3.1 オーバーエクストルージョンの発生方法

熱溶解積層方式の3Dプリンタは、ホットエンドの移動に合わせて樹脂を押し出していくことで造形を実現する。押し出される樹脂量は、造形部の太さと長さによって算出されており、造形パスの一部として記述される。そして、ホットエンドの移動中は一定の樹脂を押し出し続けるために、ノズルにかかる圧力が一定に保たれている。オーバーエクストルージョンは、この圧力のバランスを意図的に崩すことで発生させることができる。その方法は大きく分けて2つある。まず、樹脂の押出量を瞬間的に増やす方法である。つまり、3Dプリンタのホットエンドが指定した位置に達したときに、追加の樹脂を押し出すことで、オーバーエクストルージョンを発生させる。この方法は、名称の通りの処理を行っており制御も容易であるが、圧力が安定するまで樹脂が溢れ続けるため、図2上段に示すように尾を引いた形状に膨らむ。もうひとつは、造形を一時停止させる方法である。つまり、3Dプリンタのホットエンドを指定した位置で停止させ、樹脂が溢れるのを待つことでオーバーエクストルージョンを発生させる。この方法は、追加の圧力がかからないため、図2中段に示すように綺麗な膨らみを作り出すことができる。しかし、ホットエンドの圧力は停止するたびに低下し、結果として移動中に押し出される樹脂が不足していく。そこで提案手法では、これら2つの方法を組み合わせて、一時停止で溢れさせた分の樹脂を移動中に補填して圧力を安定させるという方法を採用した(図2下段)。この手法のためには、停止時間と追加押出量の設定が必要である。これについては、4章「予備実験」で実験結果とともに述べる。

3.2 提案手法によって実現する表現

提案手法を利用する状況および利用することで可能になる表現として、表面デザインへの活用と、プレビュー時と異なる結果を得る造形が考えられる。これらの利

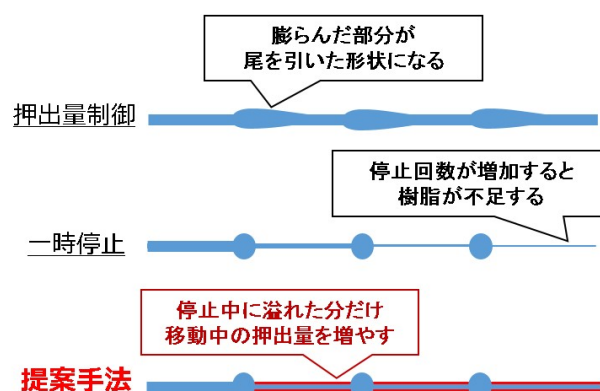


図2: オーバーエクストルージョンの制御方法と造形部分の特徴

点について、先行事例と関連研究を踏まえて詳細を述べる。

3.2.1 表面のデザイン

3Dプリンタの魅力として、造形物の表面に自分だけのオリジナルのデザインを施せることがあげられる。スマートフォンのケースなどが代表的な例であり、3Dプリンタを用いた商業として確立されている。これを実現するため、従来のモデリングソフトウェアには、エンボスツールを用いて表面を加工できるもの[7]、画像から3D形状を作れるもの[17]などが見られる。また、研究テーマとしても注目されており、さまざまなアプローチが提案されている[12][14]。

従来の手法を用いて、表面(特にプラットフォームと垂直な外壁)にデザインが施された3Dモデルを造形する際には、オーバーハングの有無に注意を払う必要がある。一定以上突き出した部分にはサポート材が必須であり、これには追加のコストが必要になってくる。提案手法は、オーバーエクストルージョンを制御して外壁を膨らませることで、表面デザインの造形を実現する。さらに、膨らむ部分は外壁自身であるため、オーバーハング部分の考慮が不要である。

3.2.2 従来のプレビュー機能で確認できない造形

造形物をプレゼントとして贈ることが一般的になってきており、祭日が近づくと3Dプリンタ情報サイトや造形代行サービスサイトなどが賑わいを見せている。今後、3Dプリンタがより普及することで、3Dモデル

データ自体をプレゼントし、それぞれの環境で造形してもらおう、というやり取りも盛んになっていくだろう。

ところで、3Dプリンタのホストアプリケーションの多くにはプレビュー機能が搭載されている。これによって、造形位置やサイズ、樹脂使用量、造形時間などを事前に確認することができるため、3Dプリンタを効率的に扱う上で必要不可欠な機能である。

しかし、造形物や3Dモデルデータのやり取りを想定したとき、プレビュー機能があることで造形される3Dモデルが事前に確認できてしまう。これは、包装を開ける前に中身が知れてしまうような状況であり、贈り物としての価値を低下させる要因になり得る。印刷の価値を高める取り組みとして、渡邊らは[8]を提案している。造形物が出力される過程に目を向け、造形完了までのお楽しみという体験を提供することで、贈り物として価値を高めることができるのではないだろうか。

提案手法が活用するオーバーエクストルージョンは、造形時の停止命令によって起こる現象であるため、停止命令の表示がないプレビュー機能では事前の確認ができない。これにより、造形することではじめてわかるデザイン造形という体験を提供することが可能になる。また、造形が進むことで少しずつ情報が読み取れるようになる、という造形時間の演出への利用も期待される。このような仕組みを活用することで、造形物としての価値を高めることに貢献できるだろう。

4 予備実験

ここでは、オーバーエクストルージョンを制御するために行った予備実験について述べる。この実験は、造形の停止時間と樹脂の追加押出量の調査からなっており、提案手法のための最適なパラメータを決定することを目的としている。なお、いずれの実験も熱溶解積層方式の3Dプリンタ Atom¹ を使用している。このプリンタの仕様と造形に関するパラメータは付録Aを参照されたい。

4.1 停止時間の調査

造形を一時停止する時間と溢れ出す樹脂の量との関係を明らかにし、オーバーエクストルージョンによって膨らむ部分の大きさを調査する。

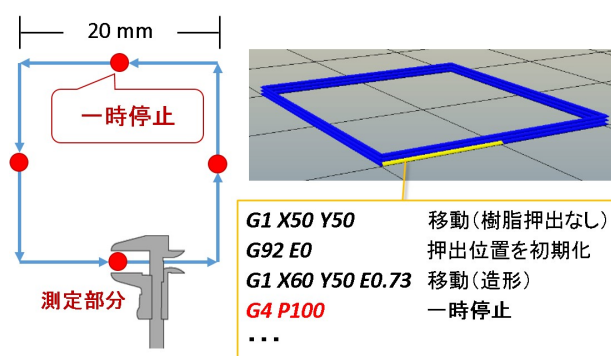


図 3: 一時停止実験用モデルの造形パスと Gcode の例

4.1.1 実験環境

3Dプリンタ制御用のホストアプリケーションとして、Repetier-Host²を使用する。スライサにはCuraEngine³を使用し、Repetier-HostのGcodeエディタ上で編集を加えることで実験用モデルを作成した。また、造形結果はデジタルノギス(AD-5765-100)を用いて測定する。

4.1.2 実験用 3D モデル

実験用に作成した3Dモデルを図3に示す。図3左のように、ホットエンドは一辺20 mmの枠状の造形パスを通り、各辺の midpoint で停止命令を送信する。この形状を積層ピッチ0.3 mmで3層分造形する。図3右は、これをRepetier-Hostのプレビュー機能で観察した様子であり、Gcodeの一部を例として同図中に示した。

図中のGcodeの4行目にある「G4」命令が、3Dプリンタを一時停止させる命令であり、パラメータPで指定された時間[ms]だけ造形が停止する⁴。このG4命令を書き換えることで、停止命令なしと停止命令ありの6パターン(0, 10, 50, 100, 200, 500 ms)、合計7パターンを構築する。0 msの停止命令は実際に造形を停止させることはないが、各命令を逐一処理するという3Dプリンタの仕様上、この命令の有無自体で結果が変わる可能性がある。これらをそれぞれ5回ずつ造形し、一時停止による膨らみ部分の直径を測定する。

²<http://www.repetier.com/>

³<http://reprap.org/wiki/Cura>

⁴http://reprap.org/wiki/G-code#G4:_Dwell

¹<http://genkei.jp/3d-printer/>

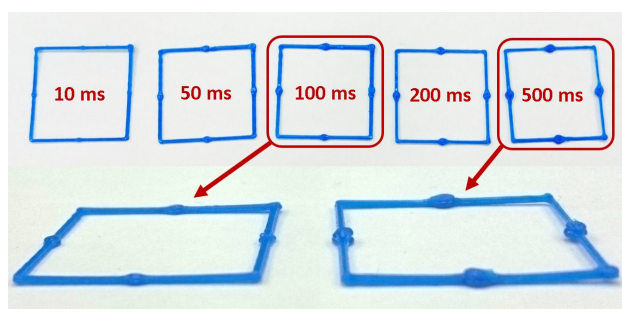


図 4: 停止時間に関する実験の造形結果

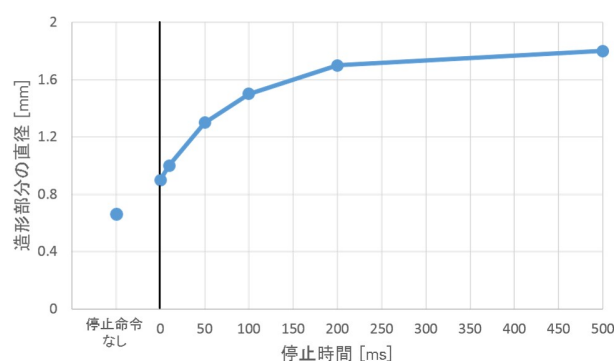


図 5: 停止時間に関する実験の測定結果

4.1.3 実験結果

実験によって得られた造形物を図 4 に示す。図 4 中に記載した時間はそれぞれの造形中に挿入された停止時間であり、図 4 下部には、100 ms と 500 ms の造形物を側面から見たものを示す。停止時間と測定結果との関係を図 5 に示す。それぞれの直径は 5 回の測定の平均を示しており、停止なしは 0.7 mm、停止ありは時間順に 0.9、1.0、1.3、1.5、1.7、1.8 mm となった。

4.1.4 考察

実験結果より、停止時間とそれによる膨らみ部分の直径には対数関数のような関係があることが推測できる。また、実験環境では 0 ms の停止であっても、瞬間的に造形が停止し、オーバーエクストルージョンが発生することが明らかになった。この 0 ms の停止が本手法によって表現できる最小サイズといえる。図 4 の 10 ms の例からもわかるように、この停止時間による膨らみはごく僅かであり、見た目には大きな変化はない。そして、停止時間に比例してサイズが大きくなり、500 ms の停止時間では 1.8 mm 程度の膨らみに至っている。しかし、図 4 下部に示すように、停止時間が長

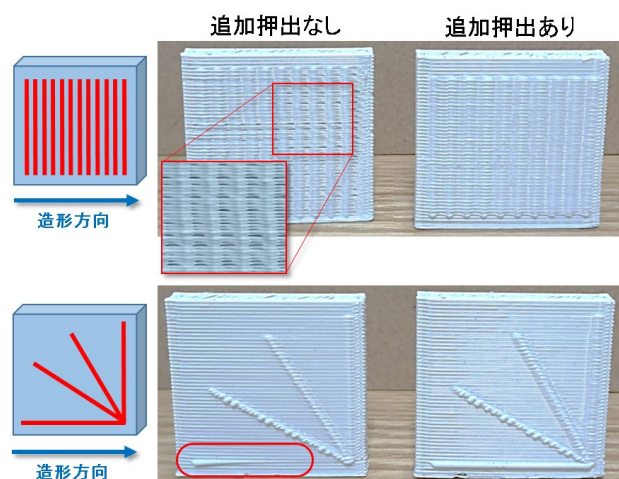


図 6: 100ms の停止における追加押出しの有無による造形比較

くなると樹脂が上下に膨らんでいくことが確認できる。このような箇所が生まれると、上部に積層される部分が不安定になり、全体として造形品質の低下を招くことになる。

以上より、提案手法では、造形品質に影響のない値を優先して、100 ms の停止時間をデフォルト値として採用する。100 ms の停止を挿入した造形物を図 6 に示す。3 章で述べたとおり、停止命令のみでは樹脂不足の隙間ができてしまったり、横方向に連続するような膨らみが造形できないことがわかる。この不足した分の樹脂を補填し、図 6 右のように均一に造形するために、追加押出量の調査を実施する。

4.2 追加押出量の調査

ここでは、不足した樹脂を補填するために、最適な追加押出量について調査する。なお、実験環境は停止時間の調査と同一であり、停止時間は前実験で得られた 100 ms で固定する。

4.2.1 実験用 3D モデル

実験用に作成した 3D モデル、これをプレビュー機能で観察した様子と Gcode の例を図 7 に示す。追加押出量の調査では、幅 40 mm の壁状の 3D モデルに停止命令を挿入したものを使用し、これを積層ピッチ 0.3 mm で造形していく。ここで、挿入された停止命令は、縦と横のそれぞれ方向に縞模様を描くような配置になって

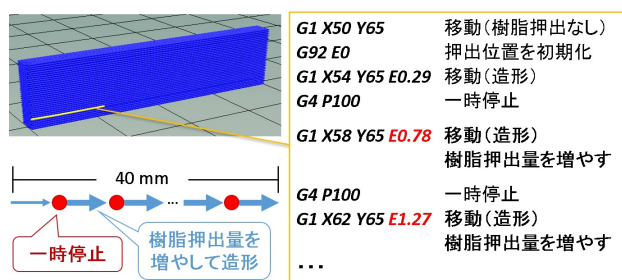


図 7: 追加押出実験用モデルの造形パスと Gcode の例

いる。縦方向は、一定間隔で 10 本の縦線が並ぶような縞模様になっており、樹脂の不足による隙間が生じるかどうかを観察する。横方向は、3 本の横線が並ぶような縞模様になっており、横方向に連続する膨らみが正しく造形できるかどうかを観察する。

図中の「G1」命令の E パラメータが移動時の押出量を設定しており、この値は移動するたびに加算されていく（値の分だけ樹脂が巻き取られる仕組み）。ここに、指定した値を停止時にも加えることで、移動中の追加押出量を実現する。例えば、図中の 5 行目は 0.2 mm の追加押出を行った場合の E パラメータになっている（本来であれば、同じ距離を移動したため「E0.58」となるべきところであるが、「E0.79」と書き換えている）。そして、追加押出量の変化として、5 パターン (0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 mm) をそれぞれの縞模様に対して構築した。

4.2.2 実験結果および考察

実験によって得られた造形物を図 8 に示す。縦・横方向の両者とも、0.05 mm 程度の僅かな追加押出を行うだけで、安定した膨らみが作れていることが確認できる。特に横方向は、押出量を増やしていくと、はっきりと縞模様が見て取れるようになってくる。しかし、0.5 mm 程度に至ると、追加樹脂が不足分を大きく上回り、外壁に溢れ出るような形状になっている。こういった表現に活用することも可能であるが、縦方向と組み合わせることを考慮すると好ましい形状とは言いがたい。

縦方向には大きな変化がないように見えるが、0.5 mm の追加押出では縞模様全体とその谷間が僅かに手前に突き出している（図 2 参照。提案手法の赤線を太くした形状）。これも不足分を上回った追加押出によるものであり、縞模様が見えにくくなるのが懸念される。

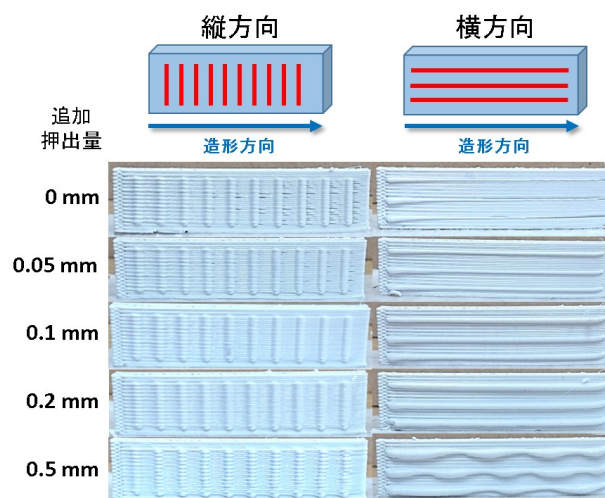


図 8: 縦・横方向の追加押出量に関する実験結果

以上より、本稿では、縦・横のそれぞれの方向を安定させる値として、0.1 mm の追加押出量をデフォルト値として採用する。

4.3 予備実験のまとめ

予備実験の結果より、提案手法のためのパラメータを以下のように設定する。

停止時間 100 ms
追加押出量 0.1 mm (停止するたびに加算)

次章のデザインシステムでは、この値をデフォルト値として採用する。これらは安定した造形が行える最適値であり、意図的に異なるパラメータを利用する状況も考える。そのため、デザインシステムはこれらの値を任意に変更可能な仕様に設計する。

5 デザインシステム

ここでは、提案手法を活用するために構築したデザインシステムについて述べる。システムを利用することで、3D モデルへのドローイング操作によってオーバーエクストルージョン発生位置を指定することができる。なお、実装にはビジュアルプログラミング言語 vvvv を使用した。

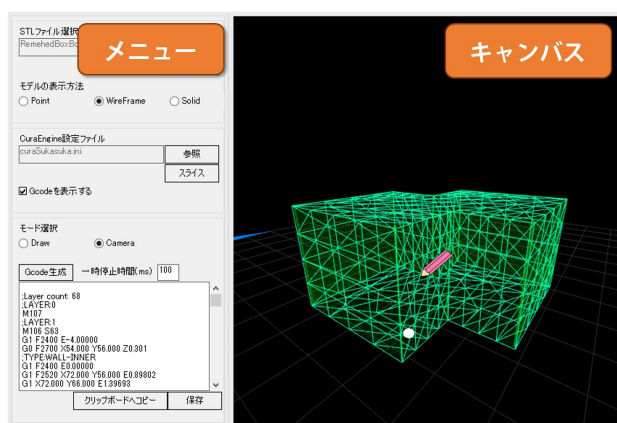


図 9: デザインシステム全体図

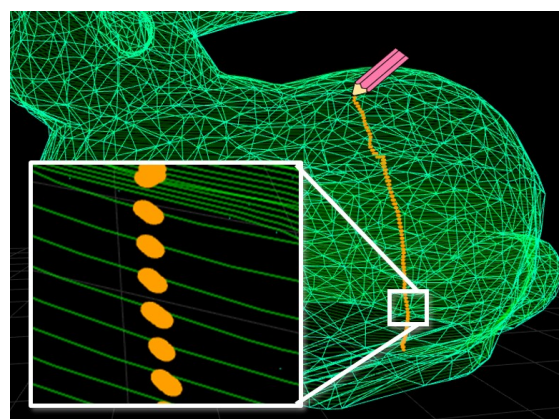


図 10: モデルへの手描き入力の様子

5.1 システム概要および使用方法

デザインシステムの概観を図9に示す。システムは、メニューウィンドウとキャンバスからなっており、ユーザはこれら进行操作してペイントソフトを扱うようにオーバーエクストルージョン発生位置を指定していく。

まず、メニューウィンドウより3Dモデルの読み込みを行う。システムでは、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モデルはキャンバスに表示され、Point、WireFrame、Solidの3つのレンダリング方法で観察することができる。

次に、3DモデルをスライスしてGcodeを生成する。スライサは外部のソフトウェア(CuraEngine)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。生成されたGcodeは、メニューウィンドウ下部のテキストボックスに表示され、造形パスとして3Dモデルに重畳表示される。

最後に、キャンバスでのドローイング操作でオーバーエクストルージョン発生位置を指定し、新たなGcodeを再生成する。このとき、ユーザは並行してカメラを操作していく必要があるが、システムはこのカメラ制御に「追従」、「固定」の2つのモードを搭載している。ドローイング操作を完了したら、生成ボタンを押すことで新たなGcodeを得る。生成結果は、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る。

5.2 ドローイング操作時のカメラ制御

提案システムでは、マウスの左ボタンを押しながらドラッグ操作を行うことで、Gcodeを編集して行うことができる(図10)。この手描き操作を容易に行うための機能として、次の2つのカメラ制御モードを実装した。ユーザは、これらを必要に応じて切り替えながらドローイングを行う。

5.2.1 カメラ追従モード

ユーザのドローイング操作に合わせて、カメラの移動と注視点を制御するモードであり、ACCD[21]を参考にして実装した。システムは、ワールド座標系におけるカメラと3Dモデルの座標値、スクリーン座標系におけるマウスカーソルの座標値を用いて、カメラからマウスカーソルに向かって伸びるレイと、3Dモデル内のポリゴンとの交点を計算する。この交点は、交差する3Dモデルのポリゴンの位置によって複数個得られるが、現在はカメラから一番近い座標を交点として採用している。

そして、カメラの注視座標を3Dモデルとの交点に向け、カメラの位置座標を交点から伸びるポリゴンの法線と平行になるように移動させていく。ここで、カメラが常にポリゴンの正面に位置していると、すぐ隣のポリゴンが90度以上奥に傾いている場合(立方体の外壁など)に、それ以上の移動が不可能になってしまう。この問題の解決方法として、交点の位置によってカメラの位置に重み付けを行っている。実際には、交点がポリゴンを構成する内の1頂点に近づいていくと、法

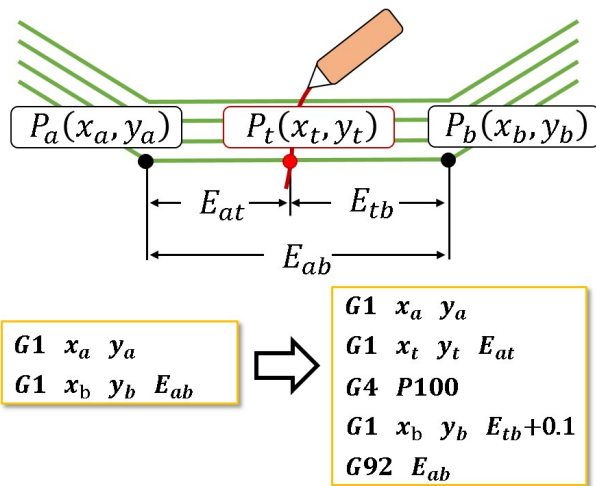


図 11: 停止命令の挿入と Gcode の編集 (P は Gcode を構成する頂点であり, E はその距離の移動中に押し出される樹脂の量を示している.)

線ベクトルとレイとのなす角が大きくなるように調整する。

以上の仕組みによって, カメラはポリゴンに対して正面を向いた位置関係になり, 3D モデルの表面をなぞるように移動していくことができる. このモードを用いることで, 複雑な表面に対しても容易に手描き入力が可能になる。

5.2.2 カメラ固定モード

一般的なモデリングソフトウェアと同様に, ドローイングツールとカメラを別々に操作するモードである. マウスの右ボタンを押したドラッグ操作をカメラの制御に割り当てている. 現在の実装では, X 座標の変化量を Pitch 軸周りの回転, Y 座標の変化量を Yaw 軸周りの回転としている。

3D モデルに平面部分が多い場合は, こちらのモードを使用してカメラをポリゴンの正面に向くように設定すると効率的である. さらに, このモードはその視点からの見え方をデザインすることにも使用できる. これについては 6 章「造形例」で説明する。

5.3 停止命令の挿入

図 11 に, 停止命令の挿入とそれに伴う Gcode の変更の仕組みを示す. これは, 頂点 P_a から頂点 P_b まで

のホットエンドの動きを表しており, その間に樹脂は $E_{ab}[\text{mm}]$ だけ押し出されるものとする。

まず, システムは生成された Gcode から外壁部分だけを抽出し, ユーザによって記述された座標の Z 座標値を, 積層ピッチにマッピングしていく (図 10 拡大部). これによって, 図 11 中の頂点 P_t のように, 特定の辺上に位置するようになる。

次に, 頂点 P_t までの移動と停止命令の生成を行う. 移動は Gcode の G1 命令を用いて, 移動先の座標値と移動中に押し出す樹脂の量をパラメータとして指定する. ここで, 頂点 P_a から頂点 P_t までに押し出す樹脂量を E_{at} とすると, 移動量との関係から次の (1) のように計算できる。

$$E_{at} = E_{ab} \frac{|P_a P_t|}{|P_a P_b|} \quad (1)$$

以上より, この移動の Gcode は「G1 $x_t y_t E_{at}$ 」と書くことができる. そして, 移動命令に引き続いて停止命令「G4」を挿入し, 停止時間 [ms] を設定する. 同様に, 頂点 P_t から頂点 P_b までの移動と樹脂の押出量 E_{tb} を計算するが, こちらには樹脂の追加押出分を加算したパラメータ E を設定する。

最後に, 現在位置の再設定命令「G92」を挿入して, パラメータ E の位置をもとの Gcode の状態に設定する. この命令は, 再設定するパラメータのみを指定すれば良いため, 「G92 E_{ab} 」となる。

この一連の処理による Gcode の変化を, 図 11 下部に示す. システムは, ユーザが入力したすべての座標に対してこのような処理を行っていく. なお, 同一辺上に複数の一時停止点が存在する場合, 始点から近い順に再帰的に処理を行っていく。

5.4 Gcode の利用と造形

新しく生成された Gcode は, メニューウィンドウのボタン操作で, テキストファイルとしての保存とクリップボードへのコピーが行える. この Gcode は, Repetier-Host などの Gcode エディタを搭載したホストアプリケーションを介して利用する. 図 12 に, Repetier-Host に生成した Gcode を貼り付けた様子を示す. 造形プレビューが表示されているが, デザインシステムによって挿入されたオーバーエクストルージョンの発生位置は確認できない. 以降は通常の造形と同様であり, 3D プリンタの初期設定を行って造形を開始すれば良い。

表 1: 作例の詳細

	モデルデータ		停止箇所	推定造形時間 (停止時間)
	頂点数/ポリゴン数	レイヤ数 (全体の高さ)		
a	8 / 12	100 (30 mm)	535	13m12s (+53.5s)
b	350 / 696	134 (40 mm)	791	23m54s (+79.1s)
c	8 / 12	100 (30 mm)	1159	36m50s (+115.9s)
d	10 / 36	134 (40 mm)	1130	52m45s (+113.0s)

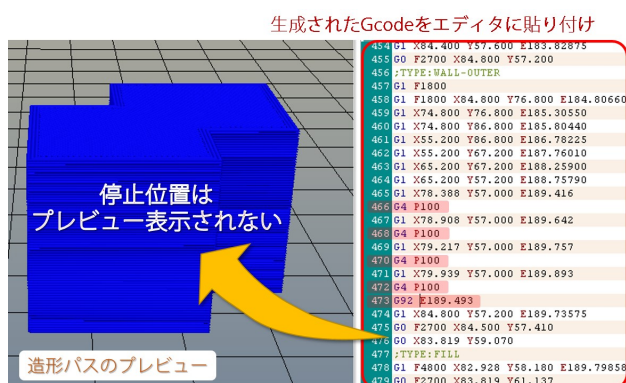


図 12: 既存のホストアプリケーションを用いた Gcode の利用

6 造形例

図 13 に本手法を用いて制作した作例を示し、各作例の詳細を表 1 にまとめた。3D プリンタの設定および造形環境は、予備実験の環境と同一であるため、詳細は付録 A を参照されたい。ここでは、これらの作例を取り上げた目的と想定される利用方法を中心に紹介し、作例に基づく議論は次章にて行う。

(a) 壁状モデルへの文字の記述

3D モデルの壁面に文字や模様を造形することは、提案手法の主要な応用先と考えられる。作例 (a) はこれを実践したものである。図示したとおり、10 mm 四方程度の大きさの文字であれば、十分に読み取れる精度で表現できることが確認できる。また、造形時は下部から順に文字が現れてくるため、造形することで初めて現れるメッセージなどを作ることができる。制作時はカメラ固定モードを使用し、特定の平面に向けて文字を手描きするだけで良い。

(b) 円柱を利用したペイントローラの制作

曲面に対して提案手法を適用した作例である。カメラ追従モードを使用することで、曲面をなぞるようにドローイング操作を行うことができる。特に、

PaintRoller[13] を意識したデザインになっており、インクを付けて紙面に転写するといった用途に利用できる。デザインシステムに入力文字の鏡像化機能を加えれば、より効率的にこのような作品が作れるようになるだろう。

(c) 箱状モデルの側面デザイン

箱状モデルの各側面に数字をデザインしたものである。この作例では、デザインシステムの実装に使用したビジュアルプログラミング言語 vvvv の機能を活用した。この言語は、映像表現に特化しているおり、文字や図形の座標データを容易に生成することができる。その座標データを手描き入力された座標のように扱えることを実践した例である。手描き入力という使用方法とは異なるが、提案システムがこのような拡張性を兼ね備えていることを示す目的で制作したものである。

(d) 視点によって見え方の異なる階段

カメラ固定モードを使用し、複数の視点から手描き入力を行った作例である。デザインが干渉しないように描き分けることで、Appearance-Mimicking Surfaces[15] のように、視点によって見え方が異なる表面デザインが可能になる。造形後の鑑賞視点はドローイング時のカメラ位置で決定されているため、平面にイラストを描くような感覚で入力を行うだけで良い。このように、鑑賞視点によって見え方が異なる作品が、カメラモードと位置の変更のみで容易に作るができる。

7 議論

ここでは、提案手法について 6 章の造形例をもとにして、造形エラーであるオーバーエクストルージョンを用いた表現手法、Gcode へのアクセス、3D プリンタにおけるプレビュー機能という観点から議論を行う。

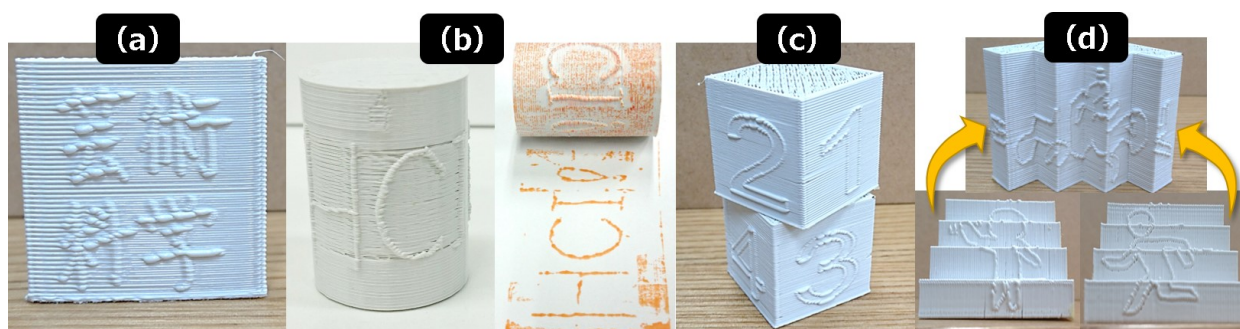


図 13: デザインシステムを使用して作成した造形例

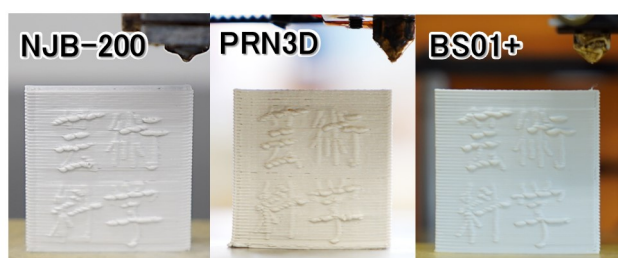


図 14: 3D プリンタによる造形比較

7.1 オーバーエクストルージョンを用いた造形手法

図 13 の作例より、提案手法を用いて文字などが壁面に造形可能であり、細かい文字であっても読み取れることが確認できる。同時に、各造形の表面に横縞の模様が確認できるが、これは提案手法の有無にかかわらず生じており、造形時の積層ピッチ設定や使用した 3D プリンタの性能によるものと考えられる。また、提案手法によって作られた部分は 3D プリンタ本来の能力に比べると高精度とは言い難く、樹脂の溢れ具合に差があることが確認できる。

しかしながら、オーバーエクストルージョンという造形エラーを活用する手法は、3D プリンタの造形品質を向上させるようなアプローチとは大きく異なっており、品質や精度だけでは比較しきれないと考えている。例えば、図 8 の横方向で 0.5 mm の追加押し出し時のように樹脂が溢れ出した壁面は、従来のモデリングソフトで意図的にデザインすることが困難である

さらに、本稿で使用した Atom に加えて、NinjaBot NJB-200⁵、Microfactory PRN3D⁶、Bonsai Lab. BS01+⁷ の合計 4 台の 3D プリンタに対して提案手法が

⁵<http://ninjabot.jp/>

⁶<https://micro-factory.net/>

⁷<http://www.bonsailab.asia/>

適用できることを確認している (図 14)。各 3D プリンタに合わせた調整は必要だが、さまざまな熱溶解積層方式 3D プリンタで利用できる手法であるといえる。

表 1 に示したように、それぞれの作例の造形時間は描画された座標値数分だけ増加することになる。この造形時間の増加は、3D モデル全体の造形時間から考えれば大きな影響にはならないと考えている。表面全体を覆う模様などをデザインする場合、停止時間が著しく増加することも想定されるが、この問題は従来の造形手法でも同様に生じる。また、総停止時間はデザインシステム上で計算することができるため、そのデザインによって増加した造形時間を伝える、などの対応が可能である。

7.2 Gcode を間接的に編集する環境

デザインシステムでは、ドローイング操作を用いて間接的に Gcode を編集することを実現した。この作業において、ユーザは表面のデザインにのみ集中すればよく、Gcode の内部的な変化はすべてシステム側が担っている。これは、従来の工程に「表面のデザイン」の工程を導入した形になっており、提案手法の利用のための学習コストは、デザインシステムの使い方に関するものだけに抑えることができている。また、現在の実装では、ホストアプリケーションへ Gcode ベーストするという作業が必要であるが、デザインシステムをスライスソフトウェアとして実装すれば、この作業も省略できるだろう。

Gcode は、3D モデルの大きさや複雑さによってはファイルサイズが著しく増加する。例えば、図 13b などは、曲面表現のために Gcode が膨大になっており、高速な処理が難しく、これらすべてをシステム上で扱うことは現実的ではない。デザインシステムでは、この

Gcodeの中から造形物の見た目に大きく影響を及ぼす外壁部分だけを抽出するという方法で、処理の高速化を実現している。外壁部分を抽出すると、Gcode全体は20～50%圧縮され、システムで処理する上で現実的なサイズになる。

しかし、このGcodeの処理と並行して、ドローイング操作のためのカメラ処理、交点計算などを行っていくと十分な処理速度が得られない場合がある。現状では、サイズが大きく、ポリゴン数の多い3Dモデルに対しては、10 fps程度の処理速度しか得られないことがわかっており、ドローイング操作に影響を及ぼす可能性があるこの処理速度の問題については、アルゴリズムの改良と処理の分割によって、ある程度改善できると考えている。

7.3 3Dプリンタにおけるプレビュー機能

近年のあらゆるソフトウェアやデバイスは、プレビュー機能を搭載しており、時間のかかる処理の試行錯誤が容易に行えるようになってきている。従来の2Dプリンタでも「印刷プレビュー」は欠かせない機能であり、印刷の精度を高めるために貢献しているといえる。もちろん、3Dプリンタの造形においてもプレビュー機能は必須である。しかし、2Dプリンタが求めるプレビューの要件とは大きく異なることに注目したい。

写真や文章などのコンテンツを、デジタルなデータ形式でやり取りするという文化は広く浸透しており、ディスプレイ上の確認が良い、という方針が取り得る。しかし、3Dモデルは、造形して初めて得られるものであり、ディスプレイ上で3Dモデルを眺めることと、造形物を手に取ること、という大きな違いがある。ところが、現状の3Dプリンタのプレビュー機能は、どのような造形物が得られるかが造形前にわかる。著者らは、このプレビュー機能が、造形されたときの喜びや驚きを減少させるネタバレに値すると考えている。それは、あたかも包装を開ける前に中身が分かってしまうような状況、何が贈られるか分かっており到着まで待機するような状況である。

提案手法によって施されたデザインは、停止命令によって造形中に作りされるため、従来のプレビュー機能では確認することができない。なお、図12で示したとおり、隠される要素は3Dモデルの表面に施されたデザインの部分のみであり、造形位置や使用する樹脂の量など、通常の造形に必要な情報はこれまで通り確認す

ることができる。もちろん、Gcodeの中から停止命令を探索してプレビューする、という機能は容易に実現できる。しかし、これまでの3Dプリンタの利用方法を想定すると、提案手法のような特殊な使い方を確認すること以外で、ユーザが停止命令を見られるメリットはない。今後は、3Dプリンタのプレビューにはどのような機能が必要か、ユーザは造形前に何を確認しているのか、という点に注目して本研究を発展させていく。

8 おわりに

本稿では、熱溶解積層方式3Dプリンタでオーバーエクストルージョンを制御・活用する手法を提案した。予備実験で適切な停止時間と追加押出量について調査するとともに、ドローイング操作でオーバーエクストルージョン発生位置を指定できるデザインシステムを構築した。そして、システムを用いた作例を示し、オーバーエクストルージョンによる表現について議論を行った。今後の課題として、異なる3Dプリンタやさまざまな樹脂を用いた場合の造形結果についての調査があげられる。それらの環境下で安定して提案手法を用いるために、利用条件の整理、造形誤差の補正、キャリブレーションの仕組みについて研究を行っていく。これらの課題の解決とデザインシステムの洗練を行い、新しい造形手法として確立させる。

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] Simplify3D - Print Quality Troubleshooting Guide (Over Extrusion). <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#extruding-too-much-plastic> (参照 2016年9月30日).
- [2] 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.

- [3] Mueller, S., Im, S., Gurevich, S., Teibrich, A., Pfisterer, L., Guimbretiere, F. and Baudisch, P. WirePrint: Fast 3D Printed Previews. In Proc. of UIST'14, pp. 273-280, 2014.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 5axismaker. <http://5axismaker.com/> (参照 2016年9月30日).
- [7] Microsoft 3D Builder. <https://www.microsoft.com/ja-jp/store/apps/3d-builder/9wzdncrfj3t6> (参照 2016年9月30日).
- [8] 渡邊恵太, 松田聖太. HappyPrinter: 印刷物の価値を高めるプリンタ装置. 情報処理学会, インタラクシオン 2011 論文集, pp. 413-414, 2011.
- [9] Retouch3D: a Brand New Way to Finish 3D Prints. <https://www.kickstarter.com/projects/1654851065/retouch3d-a-brand-new-way-to-finish-3d-prints> (参照 2016年9月30日).
- [10] MODIFI3D : 3D Print Finishing Tool. <https://www.kickstarter.com/projects/steelmans/modifi3d-3d-print-finishing-tool> (参照 2016年9月30日).
- [11] Zhang, Y., Yin, C., Zheng, C. and Zhou, K. Computational Hydrographic Printing. ACM Trans. Graph., 34, 4, Article 131, 2015.
- [12] Torres, C., Campbell, T., Kumar, N. and Paulos, E. HapticPrint: Designing Feel Aesthetics for Digital Fabrication. In Proc. of UIST'15, pp. 583-591, 2015.
- [13] Kok, M. Patterned Paint Rollers. <http://www.matthijskok.nl/patterned-paint-rollers/> (参照 2016年9月30日).
- [14] Dumas, J., Lu, A., Lefebvre, S., Wu, J. and Dick, C. By-Example Synthesis of Structurally Sound Patterns. ACM Trans. Graph., 34, 4, Article 137, 2015.
- [15] Schüller, C., Panozzo, D. and Sorkine-Hornung, O. Appearance-mimicking Surfaces. ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH ASIA), 33, 6, Article 216, 2014.
- [16] Furferi, R., Governi, L., Volpe, Y., Puggelli, L., Vanni, N. and Carfagni, M. From 2D to 2.5D i.e. from Painting to Tactile Model. Graphical Models, 76, 6, pp. 706-723, 2014.
- [17] SELVA-3D - Transform 2D Images into 3D Models. <http://www.beta.selva3d.com/> (参照 2016年9月30日).
- [18] "2.5D Printing" - Block Printing With a 3D Printer. <http://3dprint.com/80006/2-5d-printing/> (参照 2016年9月30日).
- [19] Khan, A., Komalo, B., Stam, J., Fitzmaurice, G., and Kurtenbach, G. Hovercam: Interactive 3D Navigation for Proximal Object Inspection. In Proc. of Interactive 3D graphics and games, pp. 73-80, 2005.
- [20] Fu, C.-W., Xia, J. and He, Y. Layerpaint: a Multi-layer Interactive 3D Painting Interface. In Proc. of CHI'10, pp.811-820, 2010.
- [21] Ortega, M. and Vincent, T. Direct Drawing on 3D Shapes with Automated Camera Control. In Proc. of CHI'14, pp. 2047-2050, 2014.

A 付録：3Dプリンタの詳細および造形パラメータ

本稿では、熱溶解積層方式の3Dプリンタ Atom (<http://genkei.jp/3d-printer/>) を使用した。この3Dプリンタの造形エリアは140 × 140 × 130 mmであり、本稿中のすべての造形物はプラットフォームの中心(70,70)に造形されるように設定されている。造形時には、プラットフォームにマスキングテープを貼り、1層目を安定させるために液体糊を塗った。

樹脂は、標準的な1.75 mm径のABS樹脂(PLASILプレミアムABSフィラメント)を使用した。また、膨らみ部分の確認のために、本稿の図には白色樹脂で造形した結果を優先して示している。

造形に関する主要なパラメータは以下のとおりである。

- ホットエンド径 0.4 mm
- ホットエンド移動速度 1800 mm/min
- 温度(ホットエンド) 230 °C
- 温度(プラットフォーム) 100 °C
- 樹脂押出量 0.73 mm(10 mmの移動に対する量)
- 積層ピッチ 0.3 mm

高橋 治輝



明治大学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年度より同研究科博士後期課程に在籍するとともに明治大学工学部助手。

宮下 芳明



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。