

熱溶解積層方式 3D プリントを用いた表現と造形手法のデザインのためのパラメータ探索手法

高橋治輝^{1,a} 宮下芳明^{1,b}

概要: 熱溶解積層方式 (FDM; Fused Deposition Modeling) 3D プリントの表現力拡張を目指して、造形時の各パラメータを探索する手法を提案する。まず、FDM を制御するためのパラメータを整理し、これらの変化具合を波形編集のように記述可能にするシステム Gcode synthesizer を提案する。このシステムは、ノズルの移動経路、高さ、移動速度、樹脂量という 4 つのパラメータの変化を 1 本の線状の造形物に反映して出力する。次に、こういったパラメータ変化を構造として記述可能にするシステム Structure editor を提案する。このシステムはキャンバスを持っており、構造をパスのように記述することを可能とする。パスの各頂点では、樹脂量、造形温度、停止時間のパラメータを追加することができる。本稿では、これらのシステムを用いて先行研究の分析と再現を行い、「造形手法」のデザイン例を示す。FDM 方式の 3D プリントの制御からスタートするものづくり環境について議論するとともに、この方式が目指すべき未来と 3D プリントを用いた表現について議論する。

FDM-specific Expression: Exploration of Parameters for Designing Expression and 3D Printing Techniques with FDM

HARUKI TAKAHASHI^{1,a} HOMEI MIYASHITA^{1,b}

Abstract: To extend the expression of a fused deposition modeling (FDM) 3D printer, we present the concept of FDM-specific expression, a fabrication environment that exploits the uniqueness of FDM. We first summarize parameters that control an FDM printer and present Gcode synthesizer to explore how the parameters can be configured and combined in the process. This system comprises multiple envelopes that enable drawing the time variation of parameters. Secondly, we analyze printing techniques with expression structure and present Structure editor for drawing a structure that controls the printer behavior. This system provides a canvas that enables drawing a structure composed of vertices and edges, which can have additional parameters. Using these systems, we replicate existing printing techniques and demonstrate a new expression. We discuss the capabilities of FDM and the significance of the expression that distinguishes it from other 3D printing technologies.

1. はじめに

1.1 表現の道具としての 3D プリント

数多くのアーティストやデザイナーが、自身の使用する道具の可能性を探索し、その道具に特有な「表現」を追究している。例えば、絵を描くためには絵の具やブラシ、キャンバスなどといった道具が必要であるが、画家たちはこれら道具とその独自性を用いてさまざまな作品を創出してきた。実際に、墨と丸筆によって可能となる表現は、絵の具と平筆によって可能となる表現と明らかに異なるはずだ。そして画家たちは、これらをさまざまな作中で使用し、フィードバックを得ることでその道具の独自性を学んでいく。同様な例として、音楽制作には音作りと呼ばれる工程がある。ミュージシャンは、シンセサイザやエフェクタのつまみを操作し、そのパラメータと出音との関係を探求することで、音色を探索していく。そして、作り出された音は楽曲や演奏の中で音楽表現として使用される。

本稿では、3D プリントをこうした表現のための道具とし

て考えたい。近年、3D プリントの発展により、さまざまな立体形状を高精度に作り出すことが可能となった[26]。その造形方式のひとつである熱溶解積層方式 (FDM) は、溶解した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造形物を作る。扱いの容易さやコストの点で他方式よりも優れており、今日では、デスクトップ 3D プリントとして代表的な地位を確立している。

アーティストや研究者は、FDM を用いた造形手法を追究している。アーティストの LIA は、彫刻作品のためにパラメータと樹脂の振る舞いを調査し、Filament sculptures [25] という作品群を作り上げた。HCI や CG の分野では、表現力豊かな造形物を作り出す手法を提供するための研究が行われている[21][23][32][38]。3D プリントを制御するための命令である Gcode やそのパラメータによって 3D プリントの振る舞いを制御するこれらの手法は、FDM の造形能力や表現の可能性を大きく拡張することに貢献している。

1.2 本研究の取り組みとインタラクションへの貢献

我々は、溶解した樹脂をノズルから押し出すという FDM の独自性に注目する。そして、FDM 方式の 3D プリントだからこそのことを「表現」と呼び、これを拡張するこ

¹ 明治大学
Meiji University.
a) haruki@meiji.ac.jp
b) homei@homei.com

とで新しい造形物や造形工程を実現することを目指す。

本稿では、FDM が要求するパラメータを探索することによって、この方式を用いて可能なことを考えるというものづくり環境を提案する。この作業のためのシステムとして、FDM のパラメータ探索を行うための **Gcode synthesizer** と構造を記述するための **Structure editor** を提案する。これらのシステムは、FDM を制御するために **Gcode** が要求する主要なパラメータを2つのグループに分けて探索を可能とする。**Gcode synthesizer** は、シンセサイザのアナロジーをもとにしたタイムラインベースのシステムであり、ノズルの移動、高さ、移動速度、樹脂量という4つのパラメータの変化を1本の線状の造形物という単純な形状に反映して出力する。**Structure editor** は、造形パスとなる **Gcode** をレイヤーベースで直接記述するためのシステムである。パス記述用のキャンバスを持っており、パスの各頂点では樹脂量、造形温度、停止時間のパラメータを追加することができる。また、各辺には **Gcode synthesizer** で作成したパラメータ変化を与えることができる。本稿では、これらを用いた探索例を示すとともに、具体的な造形手法のデザイン例を示す。

インタラクションの分野では、さまざまなデバイスやソフトウェアなどの道具に対して、どのように人間と関わらせるべきか、その結果として何が生まれ出せるか、どうすれば人間を豊かにできるか、という議論がなされてきた[30]。そのためには、対象となる道具を理解し、効果的に扱うことを可能とするシステムが必要となる。さらには、その道具の可能性を実践することで理解したり、試行錯誤的に探索したりするためのインタラクティブシステムなども重要な貢献である。本研究では、FDM 方式の3Dプリンタのパラメータを探索するためのシステムを提案し、この方式の新たな活用方法や表現力の拡張を目指す。提案システムは、FDM 方式の3Dプリンタを新しい表現のために用いたいユーザーに向けたシステムであるとともに、この方式の挙動や仕組みを理解したい人や性能を把握して環境に合わせたキャリブレーションに役立てたい人にも貢献できるものと考えている。3Dモデルとして与えられた形状を出力するだけであった3Dプリンタの可能性を突き詰め、この方式の独自性を駆使したものづくり環境の実現に取り組む。

2. FDM の独自性

2.1 他方式と比較した FDM

オープンソース化や低価格化を背景として普及した FDM であるが、造形精度や造形速度の点では高価な方式に劣る。他方式の代表として、光硬化性樹脂を用いる光造形方式 (SLA) や、粉末材料を焼き固めるレーザ焼結方式 (SLS) がある。材料や環境の安全面の問題や導入コスト、機器の大きさなどの課題があったものの、近年これらの方式の低価格化や小型化が進んでおり、資金調達に成功した話題が頻繁に見られる²。今後、これらの方式が発展し、ゆくゆく

は2Dプリンタと同様に一般ユーザーに普及するだろう。

そのような未来で FDM はどのように活躍できるだろうか。Wohlers report [48] によれば、2015年の段階で FDM の価格競争はほぼ終結したとされており、精度や速度などの性能限界も知られてきた[11]。ほぼすべての3Dプリンタが高精度な造形という共通の目標を目指して発展しているが、この潮流の中では立体形状がどの程度正確に出力されたかが評価対象であり、予期しない挙動は造形エラー[35]とみなされる。3Dプリンタに精度のみを求めるとすれば、今後は前述したような他方式に置き換わっていくだろう。

しかし、FDM は活躍の場を異なる領域に広げることでその存在感を示している。Mobile fabrication [33]では、3Dプリンタを携帯するというコンセプトのもと、ユーザーのニーズを調査し、プロトタイプシステムを示した。ここで使用されたのは FDM 方式の小型3Dプリンタとこの方式と同様な仕組みを持った3Dペン[1]である。こういった取り組みは、この方式の小型化・大型化などの改良が容易であること、振動や装置全体が傾きに強いこと、安全面なども関連する。扱いやすさを活かして、造形工程に人間を介入させるというものづくり環境にも利用されている[6][8]。

2.2 FDM の仕組みとパラメータ探索の重要性

現在、多くの FDM 方式3Dプリンタの制御には、CNC 機器向け制御命令のひとつである **Gcode** が用いられている。そして、**Gcode** の各命令は移動先の座標や樹脂量、移動速度などの数値をパラメータとして要求する。

これまでの工程では、高精度な造形を目指すためにユーザーを詳細な設定から遠ざける傾向があった。一般的に、スライサと呼ばれるソフトウェアが3Dモデルを処理して **Gcode** を作り出すが、ユーザーは処理内容に関して無知で良く、「高品質」「普通」などの項目を精度に合わせて選ぶだけで済む。より詳細な設定を可能とするスライサもあるが、出力される形状が3Dモデルとスライサによって規定されておりユーザーが関与していないという点では変わらない。

クリス・アンダーソンは自身の著書のなかで、「3Dプリンタがものを作るのに必要な情報はすべて、CAD デザインの中にある」と、3Dプリンタを用いたものづくり環境を賞賛した[50]。確かに、共通形式は普及のために重要であり、デザインの共有やリミックス文化を加速させるものであった。しかし、同時に、3Dプリンタという機器とその表現力を CAD デザインで可能なことを忠実に物質化する、というレベルに制限してしまったともいえる。

本稿で考える FDM を表現の道具として用いるものづくり環境では、FDM がどのような表現が可能かを表現者自身が探索することからはじめる。そして、その振る舞いを利用するとなりが作れるか、と発展させていく。これは、FDM の独自性を駆使したものづくり環境であり、前述した FDM

² 例えば、SparkMaker 社の SLA (<http://www.sparkmaker3d.com/>) や、Sintratec 社の SLS (<http://sintratec.com/>) など。

の利用方法のひとつとなる。こういった 3D プリンタの利用方法を実現するためには、Gcode とそのパラメータという、より低レイヤの情報にどう向き合うかが重要である。3D モデルが持っている情報は、基本的に形状だけであり、Gcode へのスライス処理を経ることで造形可能な安定したパスへと変換されてしまう。また、FDM の挙動というレベルで見れば、そもそも 3D モデルとして記述しておくことが不可能な造形手法もある。すなわち、この環境で重要なことは 3D モデリングシステムや高精度な 3D モデルの提供ではなく、FDM の振る舞いを司るパラメータをどれだけ効果的に探索できるかである。

3. FDM の独自性を用いたものづくり環境

FDM の独自性を用いた環境を、造形手法に用いられるパラメータ、構造の記述という見方で考える。ここでは、これらの探索を実現するシステムを提案し、そのシステム組み合わせたパラメータの探索例・造形例を示す。

3.1 造形手法のためのパラメータの探索

FDM 方式の 3D プリンタは、Gcode とそのパラメータによって制御される。Agarwala らは FDM に関わる変数を、制御、機器、材料、ジオメトリの 4 種類に整理しており[2]、本稿での「パラメータ」はこの分類における制御のための変数に当たる。まずは、これらのパラメータと 3D プリンタの挙動との関係を整理する。

3.1.1 3D プリンタの振る舞いとパラメータ

FDM の造形手法について考える際は、各パラメータのはたらきと 3D プリンタの挙動との関係を理解することが重要である。ここでは、これらのパラメータについて一般的な扱われ方と、造形手法としての扱われ方について分析する。なお、本稿では Gcode のやり取りが容易な RepRap ベースの 3D プリンタを想定し、造形中に使用される Gcode およびパラメータにのみ注目している。Gcode の詳細については RepRap プロジェクトの情報⁴を参照されたい。

移動 ノズルの移動命令は、造形工程の中でやり取りされる命令のほとんどを占めている。移動は Gcode の「G1」命令によって制御され、移動先の座標や後述する速度、樹脂量などのパラメータを取る。一般的には、XY 平面に 1 層分の造形を行って高さ (Z 軸) 方向に移動して次の層を造形する、という工程を繰り返す。WirePrint [27]では、この移動制御によってワイヤフレーム造形を実現し、Laput らは、樹脂を引っ張るように移動させることで毛の造形[23]を可能とした。さらに、造形パスにモジュレーションをかけることで造形物の表面の見え具合を制御する手法[32]がある。3次元空間中の移動を駆使した椅子の造形[18][22]においてもノズルの移動が重要である。

高さ 広義の積層ピッチであり、前述の移動命令中のパラメータ Z によって決まるノズルの高さ位置である。一般

的に、0.1~0.3 mm 程度の範囲から、品質や時間に合わせて選択できる仕組みが多い。高さを意図的に高く設定して、樹脂を不安定に落とすことで、ざらつきを持った構造やらせん構造が生まれる[38]。また、積層方向に生まれる跡は Staircase effect [9]と呼ばれており、これを模様として活用することも可能である。

樹脂量 移動距離や高さ設定から計算されるパラメータであり、スライサはこれを算出するための関係式を持っている。また、樹脂を押し出すだけでなく、引き戻すことも可能で、これによって移動中の樹脂溢れを防ぐことができる。高さ位置と組み合わせて造形時の太さを制御する手法[38]のほか、意図的に樹脂量を増減させることで造形物の表面に凹凸を作り出す手法[19]がある。Solid vibration[15]では 3D プリンタのプラットフォームを揺らすことで、樹脂量を間接的に制御し、造形物の表面の模様を作り出した。

速度 移動や樹脂押し出しのため、速度パラメータの設定が必要である。一般的に、安定した造形が行える速度の目安があり、造形箇所や温度に応じて速度が調整される。極端に高速な場合は、樹脂の押し出しを担当するステップモータが脱調を起こすなどのトラブルの原因となる。速度変化を用いた造形手法として、Velocity painting [46]がある。造形速度が一定以上速くなると、樹脂の押し出しが追いつかず局所的に細い構造が生まれる。これを逆手に取って、造形物の透明度を制御する手法として活用した。

造形温度 樹脂を押し出すノズルと樹脂を受けるプラットフォームのそれぞれに温度設定があり、使用する樹脂ごとに推奨温度が定められている。指定した温度に達するまでの加熱や冷却の時間が必要なため、造形前の段階で温めておく機能などもある。温度パラメータの変更は即時に反映されないため、造形中の制御は難しいが、温度による樹脂の変色を色調表現に用いた手法[7]が実践されている。

一時停止 停止命令を挿入しておくことで、造形を一定時間だけ止めることが可能である。一般的な造形で使用されることはほとんどなく、特殊な工程でもものづくりを行いたい場合に活用される。例えば、一時停止を用いることで造形工程に人間を介入させて、造形対象を編集させることが可能となる[6][8]。また、一時停止をすることでその場所に樹脂を溢れさせて模様や文字を描く手法もある[51]。

3.1.2 パラメータ探索のためのシステムデザイン

こうしたパラメータの組み合わせをどのように探索していくかが問題である。造形精度に関する調査を行う研究では、注目したいパラメータ以外は定数として扱うことが一般的である。作るべき形状はすでに確定しており(例えば、ベンチマークのための 3D モデル)、評価基準も表面品質や寸法精度などと明確に決まっていたためである。本稿で提案する環境の場合は、複数のパラメータを広範囲に調査できること、それらの組み合わせが調査できることが必要である。そのため、この探索の段階では、積層や複雑な

⁴ <http://reprap.org/wiki/G-code>

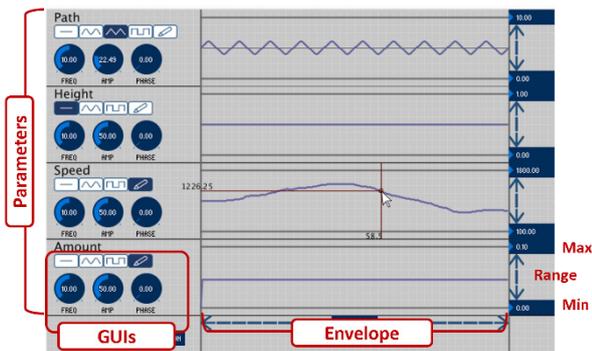


図 1. Gcode synthesizer.

形状を造形できることよりも、パラメータ調整と造形の繰り返しによって FDM 方式の 3D プリンタの可能性を追究していくことができるような環境が重要であると考えられる。また、調査結果は実際に出力されるまでわからないため、探索と造形を高速に行えると良い。

そこで、本稿では音楽制作における「音作り」にならない、波形編集でシンセサイザの音色を作り上げるかのごとく、パラメータを探索可能なシステムを提案する。タイムラインベースのシステムであり、ノズルの移動、高さ、移動速度、樹脂量というパラメータの変化を 1 本の線状の造形物に反映して出力する。この 1 本の線の造形は、シンセサイザで単音を鳴らしているような状況である。その中で複数のパラメータが互いに影響し合い、記述された変化によって構造を作り変えていく。

3.1.3 Gcode synthesizer

パラメータ空間の探索のためのシステムを図 1 に示す。実装には Processing 3 を使用した。提案システムは、1 本の線状の構造を X 軸方向に造形している際のパラメータ変化を記述し、その結果作り出される構造を探索するためのものである。システムは、奥行き (Y 軸) 方向の移動、高さ (Z 軸)、移動速度、樹脂量に対応した 4 つのエンベロープを持っている。エンベロープの最大値と最小値、横軸となる X 軸方向の移動量がそれぞれ設定可能である。

ユーザは GUI として実装されているボタンとノブを操作して、波形を扱うようにパラメータを記述する。各ノブはパラメータの変化パターンの周波数、変化量、位相に対応している。エンベロープ上にマウスカーソルを乗せると、その位置でのパラメータの数値が表示される。また、エンベロープは手描き入力することも可能で、これによって、より複雑な変化をさせることも可能である (手描き入力の際にはノブの設定は無視される)。また、提案システムにエンベロープの保存、読込機能を実装しており、これによって、自分が作ったパラメータの管理、他人が作ったパラメータ探索の結果を活用することが可能となる。

記述されたパラメータは 1 本の線状の Gcode としてまとめられて書き出されるため、これを実際に造形することでパラメータ変化による影響を確認する。Gcode は、テキス

トファイルとして書き出されると同時に、クリップボードにも書き込む仕組みとした。Gcode エディタを搭載しているホストアプリケーションであれば、そこへ貼り付けるだけで即座に造形を行うことが可能である。出力される Gcode には開始時にノズル状態を揃える処理や終了時にヘッドを移動させる処理が追加されている。

提案システムを用いると幅広いパラメータ空間を探索することができるが、極端なパラメータ設定は 3D プリンタ自体を破損させるようなエラーを引き起こす。こうしたエラーを防ぐために、提案システムは簡単な入力の支援機能を実装した。設定した値が基準値から大幅に外れる場合、エンベロープの色や太さを変えることでその状況を通知する。これには、3D プリンタのキャリブレーションガイドライン⁵として提供されている、「造形時の高さはノズル口径の 80% 以下になるように設定することが望ましい」、「造形時の太さはノズルの口径よりも僅かに太くなる」などの情報を参考にした。また、樹脂量はシステムに入力された高さや移動量から計算することができるため、自動的に最適値を設定する機能を搭載した。これを基準として、最適から僅かに外れた値などを設定することも可能である。

内部処理として、パラメータの変化を記述するため、システムは 1 本の Gcode を細かく分割し、それぞれの微小な移動を制御する命令にパラメータ設定を割り当てている。ここでは、X 軸方向に直線移動したときに、1 つの命令につきおよそ 0.2 mm の長さになるように分割した。システム側の設定を変更することで粒度を変えることができる。

3.2 構造の記述

FDM のための造形手法では、前述のパラメータ制御が造形の中に構造として組み込まれている。ここでは、パラメータ制御にのみ注目して手法を分析するために、Z 軸方向への積層を考えずにひとつの層だけを考える。スライサや設定によって詳細な構造は異なるが、Gcode 中のひとつの層は概ね図 2 のようになっている。ここに造形手法のための構造が付加されている、あるいは置き換えられている、という考え方を試みる。この構造は、その造形物の形状に装飾を加えたり、質感を変更したりする役割を果たすものだとなれば、FDM の造形手法をデザインすることは、前述

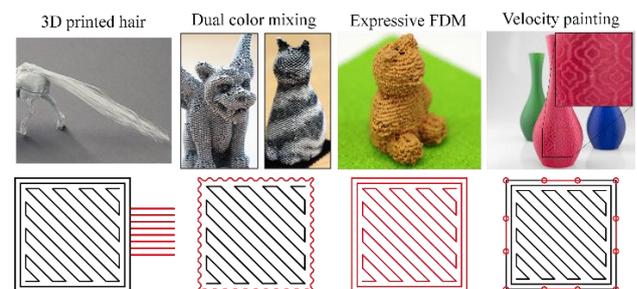


図 2. 先行研究[23][32][38][46]と構造の分析。

⁵ http://reprap.org/wiki/Triffid_Hunter's_Calibration_Guide

のパラメータ探索によって得られた知見をもとに構造を考える作業であるとみなせる。

3.2.1 造形手法とその構造

毛の造形を行った先行研究[23]は、図 2 左に示した赤線のように、樹脂を引き伸ばすことで毛を作り出す構造を付加したものである。ここで重要な動きは、造形物の外壁から外側に向かう移動である。どの位置からどの方向に向かうか、どの程度の樹脂を押し出すかなどのパラメータがこの構造の中で変化することになる。外壁にモジュレーションをかける手法[32]は、造形物の外周でのノズルの動きに変調をかけることで、最外壁として見える箇所を制御している。この構造を樹脂の色を変えながら積層していくという手法であるが、基本的な構造はサイン波のように波打った移動であり、この波打ち具合と位相が構造の中で制御される。動物の毛並みのような質感を造形可能とした手法[38]では、造形物の外周（あるいはすべての構造）を置き換えている。この構造の中で制御されているのはノズルの高さや樹脂量であり、各パラメータの関係によって作られる構造の特徴が変化する。Velocity painting[46]では、ノズルの移動速度の変化によって生じる樹脂量の差で造形物の透明度を制御している。壁の構造を部分的に置き換えて、異なる速度を割り当てたと考えることができるだろう。また、壁面の変化を際立たせるために、内部構造を取り除いて花瓶のような形状にすると透明度の差がより明確になる。一時停止命令によってその場所に樹脂を溢れさせる手法[51]は、この速度変化の極端な例であるといえるだろう。

3.2.2 構造の記述のためのシステムデザイン

パラメータの探索に引き続き、こうした構造とパラメータの変化との関係をどう探索するか、どう記述するかが課題となる。同様な作業を実現するシステムとして、Gcode を直接記述可能なエディタがある。また、Tanaka らは、Adobe Illustrator で描かれたパスを Gcode に変換するプラグイン Fabrix [39]を公開している。Silkworm [16] は、Rhinoceros と Grasshopper のためのプラグインであり、これらも構造を記述することで Gcode を直接作り出すことを可能にしている。しかし、こういったシステムは安定した造形を想定しており記述できる内容や制御パラメータに限度があった。さらに、このようなシステムを用いても、パラメータの変化具合を記述することは困難である。例えば、緩やかに速度を変化させたり、樹脂量を変えたりするような設定は無数の命令を逐一書き込んでいくという作業が必要であった。

そこで、本稿ではこうした構造を頂点と辺として記述可能なシステムを提案する。基本的には、ペイントソフトのようなキャンバスを搭載したシステムであるが、頂点と辺ごとに詳細な情報を持つように設計しており、辺にパラメータ変化を埋め込んだり、頂点で追加の命令を実行したりすることが可能である。Gcode synthesizer で扱っていなかったパラメータである造形温度、一時停止はこちらのシ

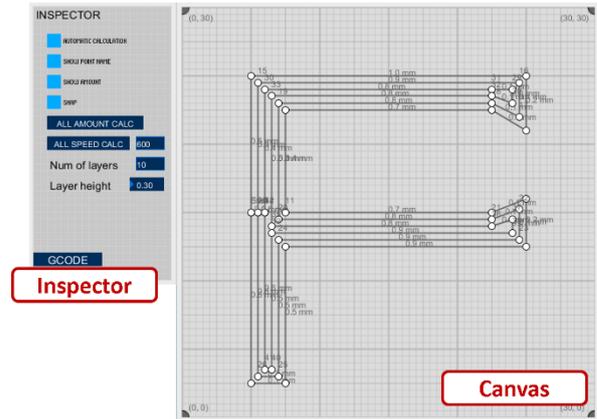


図 3. Structure editor.

ステムが担当する。これらは時間や動きに合わせて変化する命令ではなく、ある地点で指定された状態に変化するという考え方のほうが扱いやすいと考えたためである。

3.2.3 Structure editor

構造を記述して FDM の振る舞いを探索するためのシステムを図 3 に示す。なお、実装には Processing 3 を使用した。提案システムは、ひとつの XY 平面における FDM の造形パスを頂点と辺をレイヤーベースで記述可能とするものである。システムは構造を記述するためのキャンバスと頂点・辺のプロパティを設定するためのインスペクタの 2 つのウィンドウを持っている。インスペクタには、現在選択されている頂点・辺の情報やそれら进行操作する GUI が表示されており、選択されたものに合わせて切り替わる。

辺の情報として、両端の頂点の座標とその辺を造形する際の速度、樹脂量が表示される。キャンバス上の辺の描画は、この樹脂量の設定値に基づいており最適値よりも多い場合は赤く、少ない場合は青く、押し出しを行わない場合は点線で描画される。また、GUI のボタンが表示されており、これらには最適な樹脂量の自動計算、その辺を一定間隔で分割などの入力支援を割り当てた。Gcode synthesizer で作成したパラメータ変化の読み込みもここから行い、1 本の線状の構造をその辺に割り当てることができる（このとき速度と樹脂量などの辺の設定は無視される）。頂点の情報として、自身の座標、その位置を固定するかどうかのトグルスイッチ、追加パラメータ欄が表示される。追加パラメータには、その頂点に到達した際の FDM の振る舞いを記述することができ、現在は、樹脂の追加押し出し、一時停止、造形温度の 3 種類の組み合わせを任意の順序で 5 つまで追加できる仕組みになっている。それぞれ対応した値が要求されるので、樹脂押出量[mm]、停止時間[ms]、温度[deg]を入力する。頂点も辺も選択されていない（キャンバス上のなにもないところをクリックした）場合、インスペクタには樹脂量や頂点番号の表示、グリッドにスナップ、移動時に常に樹脂量を自動計算、などの設定項目が表示される。また、すべての辺に対する一括処理も用意されており、樹

脂量や造形速度をまとめて設定できる。

キャンバス上でダブルクリックをすることで頂点を追加することができる。Gcode の仕様上、最終的な造形パスは一筆書きとなるため、キャンバスのなにもないところをダブルクリックしたときは、新しい頂点を追加して現在の造形パスの最後の頂点と連結する。もし、辺の上をダブルクリックした場合は、その辺を分割するように頂点を追加し、もとの辺の両端の頂点と繋ぎ直す。なお、複数の頂点を範囲選択する機能、ある頂点や辺の情報をコピーして別のものに貼り付けたりなどの入力支援も実装した。

こうした操作で構造を作り出したあと、積層のピッチや積層枚数を設定することで、同じ構造を積層した Gcode として出力することができる。また、高さ方向に一定枚数だけ読み飛ばしてから積層するなどの出力を可能にしておき、これらを組み合わせることで、簡易的な積層造形を行うことが可能となる。これらは、インスペクタに表示される設定項目のひとつとして変更することが可能である。

3.3 パラメータの探索例

これまで、Gcode synthesizer と Structure editor という 2 つのシステムを紹介した。図 4 には Gcode synthesizer を用いたパラメータ探索例を、図 5 には 2 つのシステムを組み合わせるパラメータ制御を行った例を示す。なお、造形には FDM 方式の 3D プリント Ninjabot NJB-200⁶ を使用し、樹脂はすべて Polymaker PolyMax PLA Black を使用した。造形はホストアプリケーションである Repetier-Host⁷ を使用し、造形温度は PLA 樹脂の標準的な設定である 210 度、プラットフォームにはマスキングテープを貼り付けて造形を行った。

図 4a は毛構造の造形を再現した例である。ここでは、ノズルの高さ、移動速度、樹脂量のパラメータを制御することで細い構造の造形を実現した。先行研究[23]で紹介されていた Gcode を再現したもので、押し出した樹脂をノズルの先端で引きずる、という挙動が記述されている。手法の再現だけでなくパラメータの関係性の検証のために有用であり、例えば、ノズル高さを一定値以上にしないと樹脂がプラットフォームと接触して途切れてしまう、などから加速させないと造形の開始地点だけが極端に細くなってしまふ、などの現象を確認し、該当箇所を手描きで補正することで、これらを調整することができた。図 4 b は、ノズルの Y 軸方向の移動、移動速度、樹脂量を制御した構造である。交互に樹脂が広がっており、ミシンのステッチのように模様を描くことができている。このデザインは、ノズルを三角波の形状で動かしながら、折り返し頂点で樹脂を押し出すという挙動を記述することから始まった。そして、各地点で樹脂を広げるための減速と次の地点への素早い移動を取り入れた。樹脂を押し出したノズルを素早く引き戻す動きが特徴である。図 4 c は、太さ制御の先行研究[38]を

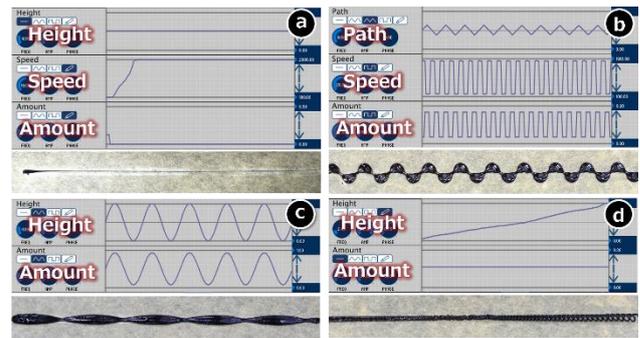


図 4. Gcode synthesizer を用いたパラメータ探索例。

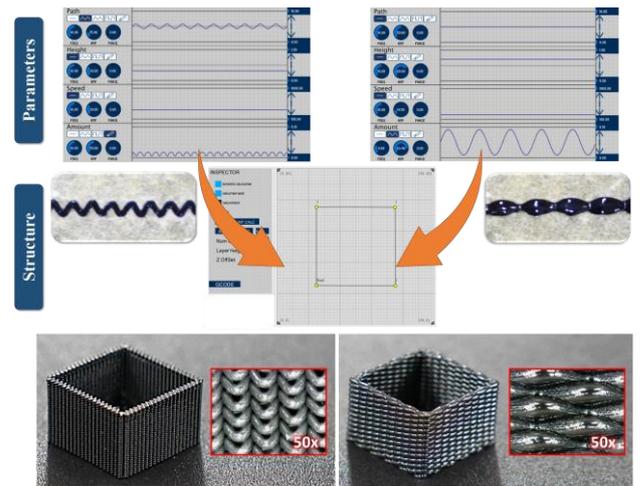


図 5. 探索したパラメータを積層した例。

再現した例であり、ノズルの高さと樹脂量を周期的に変化させることで、波打った形状を造形可能としている。各パラメータは、サイン波のパターンで変化しており、振幅を調整することで太さを制御している。また、パラメータ間の位相をずらして波打ち方の形状を変更したり、周波数を変えることで凹凸感を変えたりすることが可能である。図 4 d は、同様に先行研究[38]で調査されたパラメータ変化を再現したものである。樹脂量を多めの設定にし、ノズルの高さを徐々に上昇させると、先行研究と同様に太い構造、ざらついた構造、らせん構造が観察された。

システムを組み合わせることで、ユーザはさまざまな造形手法のためのパラメータ探索、FDM の振る舞い調査を行うことができる。例えば、図 5 に示したのは Gcode synthesizer で探索したパラメータを Structure editor で構造として記述し、層ごとに位相差を与えて造形を試みた例である。拡大図に示すように、いずれの造形物も特徴的なテクスチャを持っていることがわかる。これらを 3D モデリングで作ることは容易ではなく、仮に作り出せたとしても、データ容量が膨大となり扱いづらい形式になってしまうだろう。また、従来の工程で造形した場合、結局 FDM の積層痕（縞模様）のほうが目立つなどの結果になりかねない。

ユーザはこうしたシステムにより得られた知見をもとに、FDM の独自性を活用した造形手法を構築する。しかし、造

6 <http://ninjabot.jp/>

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

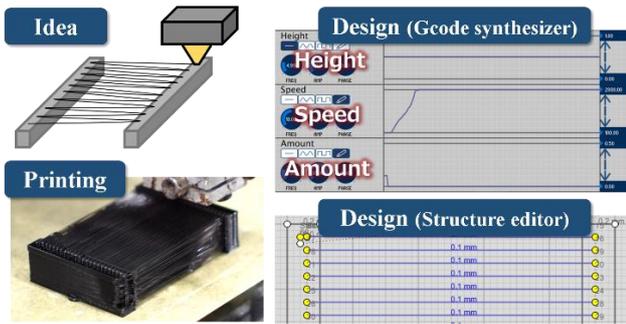


図 6. 高密度な毛構造の造形手法.

形される構造は直下の構造に影響されたり、使用する樹脂や 3D プリンタによって結果が異なったりなど、単に積み上げていくだけでは不十分な場合がほとんどである。パラメータ探索によって明らかにした挙動や造形結果などの特徴を観察し、具体的に調整可能にすべきパラメータを見極め、それぞれの造形手法としてふさわしいデザインシステムが構築できることが理想的である。次章では、具体的な造形手法のデザイン過程を示し、各システムがどのように使用されたかを紹介する。

4. 造形手法のデザイン例

4.1 高密度な毛構造の造形手法

毛構造を造形する先行研究[23]では、高温に熱されたノズルと既造形部分との接触を防ぐ必要があるため、高密度な造形が困難であると述べられていた。ここでは、この制約にパラメータ探索と構造の調整で挑み、SLA プリンタで実現された Cillia[28]に匹敵する密度で造形を可能とする。

まず、Gcode synthesizer を用いて毛構造を作り出すパラメータを探索した。この 1 本をどのような構造で、どう配置するかによってノズルとの接触が決まる。ここでは、橋のような構造を作って両端を安定させ、造形後に切り離すというアイデアを採用し、この構造を Structure editor で記述した (図 6)。ここで調査すべきは、縦横のそれぞれの方向の密度をどこまであげられるかである。これを数本の状態から試していき、最終的に縦横ともに 0.4 mm ピッチ程度までの密度で造形が可能であることがわかった (樹脂によっては 0.6 mm ピッチ程度にするとより安定する)。また、橋を渡すような構造を作るため、1 本の構造の両端で 0.2mm 程度、追加の樹脂の押し出し命令を挿入した。また、造形後にはノズルが造形物の付近や直上を通らないように迂回させるようにした。これらを数十層重ねた状態で出力し、造形可能性を調査した。造形後、片側を切り離すことで極めて高密度な毛構造を作り出すことができた。

提案システムを用いたパラメータ探索によって、この造形手法の実現可能性を調査することができた。そこで、この造形手法に特化したデザインシステムを別途実装した。デザインシステムは、毛構造の大きさや形状 (線状か円状)、各パラメータを調整可能な変数として置き換えたものであ



図 7. 高密度な毛構造の造形手法をデザインシステムとして実装。さまざまな形状に応用した例。

る。このシステムを用いることで、この造形手法がさまざまな大きさや樹脂、形状で応用可能であることを確認した (図 7)。また、先行研究と同様にドライヤーなどを用いた後処理が可能であることも確認した。これだけでも多様な表現が可能であるが、3D モデルの周囲に壁面を作って毛を生やすようなシステムなどへ発展させることも期待される。

4.2 樹脂を壁面に衝突させる造形手法

提案システムを用いて新しい造形手法を創出してみる。樹脂溢れ (Oozing) は造形中に樹脂が溢れてしまう現象であり、造形エラーの原因のひとつである。特に、造形物の壁面にその溢れた樹脂が付着すると、表面にざらつきが生まれてしまう。これを防ぐためには「樹脂の引き戻し」を設定して、移動前にノズル内の圧力を下げて樹脂溢れを防止する必要がある。ここでは、この樹脂の付着を制御することで、壁面のデザインを試みる (図 8)。

この手法で重要になるのは、樹脂が溢れ出すという現象であり、これをどういった構造で記述するかである。こういった挙動は Structure editor のみで記述することができる。そこで、システムを用いてノズルを造形物の壁面に衝突させるような構造を記述した。この構造では、まず単純な壁面を造形した後に、ノズルを壁面の外部に移動させ、その場で樹脂を僅かに押し出して、ノズルの動きで壁面に衝突させる。この方法で造形された壁面には、樹脂の衝突によ

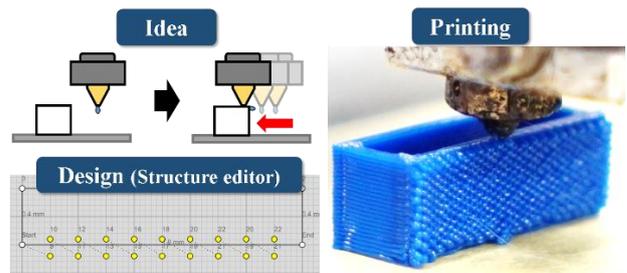


図 8. 樹脂を衝突させる造形手法.

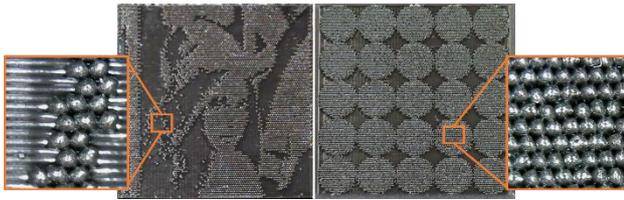


図 9. 樹脂衝突の造形手法をデザインシステムとして実装. 画像を用いて衝突位置を制御した例.

って細かい粒のような形状が無数に張り付いたテクスチャが作り出された。ここで、壁面までの距離、溢れさせる樹脂量、接触時の速度などが探索すべきパラメータである。探索を繰り返したところ、樹脂を 0.02 mm だけ押し出して、1500 mm/min 程度の速度で、0.2 mm だけ離れた位置から接触させることで一様な模様を描くことが可能であった。毛構造と同様にピッチを調べていくと縦横ともに 0.3 mm 程度が限度であった。また、意図的にピッチを広げたり溢れる量や衝突距離を変更したりすることで、ざらついた表面や細かい粒立ちを目立たせることも可能である。この形状は独特な触り心地を提供できるだけでなく、FDM で作られた造形物の積層痕を目立たなくする効果もある。

これをひとつの造形手法とみなして、前述のパラメータを調整可能なデザインシステムを実装した。溢れさせる樹脂量や衝突速度などを個別に設定できるほか、衝突位置を 2 値画像で決定する仕様とした。樹脂の溢れ具合は、そのときの造形温度や樹脂ごと軟化点によってことなるが、調整によってウッドライク樹脂、フレキシブル樹脂などの材料でも利用可能であることを確認した。これらを適切に設定することで、樹脂の衝突を用いて壁面に模様やイラストを書き出すことを可能とした (図 9)。3D モデルを処理できるようにすることで、壁面に限らず、さまざまな形状に応用可能ではあるが、一方で造形物の底面と上面には衝突が難しいと考えられる。これはこの造形手法の制約である。

5. 議論

提案システムは、パラメータ空間の探索と FDM の振る舞いという低レイヤの情報の調査に限定した。しかし、こういったパラメータ制御によって作られる構造が重要である。例えば、毛構造を造形可能とした先行研究[23]は、FDM が細い構造を造形できることを明らかにし、それを髪の毛という構造に落とし込んだ。現在では、Hairy 3D models と呼ばれる多くの類似作品が作られている⁸。FDM の振る舞いやその結果を追究することで、この方式の表現力や造形能力を飛躍的に上昇させることにつながる。また、ユーザもこういった表現が可能であることを知っていれば、デザイン段階での戦略も変わるだろう。現状、提案システムによって作られる構造は、Gcode としてまとめられているた

め、既存の 3D モデルに合わせてモーフィングできる仕組みを作り上げることで、広く応用可能であると考えている。

従来の工程では、3D モデルやスライサを調整することが主流で、「3D プリンタの挙動」というものはほとんどユーザの前に現れなかった。一方で、Gcode には 3D プリンタの挙動を制御するためのあらゆる命令が含まれている。Gcode の直接制御することは確かに容易ではないが、それ故にまだまだ探索の余地がある。何より 3D プリンタの挙動に直接注目させることで、人間との距離をより近づけるようなものづくり環境が構築できるのではないだろうか。

また、FDM で表現される構造は、この方式に特有のものであるだけでなく、その 3D プリンタに特有なものとなるかもしれない。FDM 方式 3D プリンタの種類は多様であり、造形手法が提案されるたびに、その汎用性について議論されてきた。ヴァルター・ベンヤミンは写真という複製技術に関して「芸術作品は、それが存在する場所に、一回限り存在するものなのだけど、この特性、いま、ここに在るといった特性が、複製には欠けているのだ」と述べている[52]。3D プリンタも例に漏れず複製技術であり、3D プリンタで出力されたものには「いま、ここにある」という特性は一切ないといえるだろう。むしろ、誰でも同じものを手に入れることができるようになっている。このような状況下で「私のプリンタが私の作り出した造形手法を用いて作った」という価値観は、作られたもの自体の価値、さらには 3D プリンタ自体の新たな価値を生むのではないだろうか。

現在の 3D プリンタや樹脂には性能差があり、ユーザはこれらに応じて造形パラメータを調整する必要があるという理解が必要である。これらは、Agarwala が整理した機器と材料に関する変数[2]であり、最適化手法で解決することが難しく、パラメータ設定と造形という試行錯誤を繰り返すことで身につくものである。提案システムはこうした状況におけるパラメータ探索にも役立てられると考えている。

本稿で対象とした造形手法は、3D プリンタを制御するパラメータを調整することで実現できるものにとどまっている。例えば、構造を XY 平面での挙動として考えたため、3 次元空間中の自由な移動を記述することは困難であり、WirePrint [27]や VoxelChair [18]などの手法をすべて再現することは困難である。また、環境データなどをデザインに用いた事例や、立体形状の内部を精密にデザインすることで造形物全体を用いた表現を行う事例など、本稿の提案システムでは実現困難な造形手法も数多く実践されている。こういった先行事例を踏まえつつ、FDM が実現可能な表現手法とそのために必要なシステムを追究していく。

6. 関連研究

6.1 3D プリンタを用いた新しい表現

3D プリンタで新しい表現を実現する手法の多くは、事前に 3D モデルを最適化することで実現されており、そのた

⁸ Ten 3D Printable Things: Very Hairy 3D Models
<https://3dprint.com/183974/10-3dp-very-hairy-models/>

めのコンピューテーショナルな手法が提案されている。例えば、3Dモデルの重心を制御することで、出力したキャラクタを安定して直立させることができる[31]。同様な内部の最適化によって、コマのように回転させる[4]、水に安定して浮かせる[45]なども可能である。内部の密度を制御することで、出力したキャラクタを変形可能にする手法[36]、ルービックキューブとして成立するように分割[37]したり、箱型に変形可能な3Dモデルに変換[49]したりする手法も実現されている。さらに、内部構造の最適化と壁面への音孔作成で自由な形状の楽器を作ることも可能になっている[24][44]。さらには動きの造形[12]など、3Dプリンタを用いて新しい表現を追い求める研究は枚挙にいとまがない。

MetaMorphe [42]は Web プログラミングをベースとしたモデリングシステムであり、パーソナルなデータや音声、気候、地理の情報を3Dモデリングに活用することが可能である。HapticPrint [41]では、造形物の外部と内部のそれぞれをデザインし、手触り感を表現するシステムが提案された。

このようなさまざまな表現が実現されている中で、本稿ではFDMの独自性を活用した造形手法に注目した。つまり、3Dモデリングのためのシステムや3Dモデルの最適化手法ではなく、3Dプリンタ自体の振る舞いを活用した造形手法である。先行研究として、ノズルの先端で樹脂を引きずることで髪の毛のように細い構造を作り出す手法[23]、3次元空間中の移動を駆使してワイヤフレーム造形を実現する手法[27]、ノズルの位置と樹脂量を制御することで樹脂の振る舞いを造形に活用する手法[38]、押し出した樹脂のねじれを活用したガラス3Dプリンタ[20]、変調され波打った壁面による色調表現[32]、ハッチングを造形物表面に応用した色調表現[21]があげられる。

6.2 FDMの優位性

他方式と比較して、FDMにはいくつかの優位性がある。まず、利用可能な樹脂の種類である。PLA樹脂やABS樹脂などの熱可塑性樹脂に加えて、柔らかい造形物が出力可能なフレキシブル樹脂や導電性のある樹脂などが利用可能である。HCIの分野では、導電性樹脂を用いたタンジブルユーザインタフェースの提案[34]や、フレキシブル樹脂を用いたメタマテリアル[17]の出力などで利用されている。

また、FDMは機器自体が単純な構造をしているため、比較的容易に3Dプリンタ自体を改造することが可能である。そのため、3Dプリンタの携帯というコンセプトを実証するためのプロトタイプ[33]、ミリングマシンを搭載して切削と造形を組み合わせたマシン[40]、回転するプラットフォームを搭載した3Dプリンタ[10]など、新しい造形工程を示す際にも利用されている。

さらに、FDMの扱いの容易さは、人間を造形作業に介入させるシステムの構築のためにも役立っている。一時停止させることで、造形中のものに別のものを組み合わせたり、内部に挿入したりする手法[6][8]が提案されている。また、

造形工程とモデリングの工程を統合したインタラクティブなものづくり環境[29][47]なども提案されている。また、3Doodlerに代表される手持ち式のデバイスは、FDMの樹脂押出機構をそのまま応用したものである。

6.3 FDMに関する調査

高性能かつ高速な造形を可能とするために、FDMとそのパラメータの調査が行われている。例えば、積層ピッチが造形物の表面の品質に影響を与える[3]ことや、造形速度と造形パスの形状がレイヤとそれらの接着具合に影響することが知られている[13]。また、造形工程の一部は数式でモデル化されている[43]。Belliniはこのプロセスのモデル化に取り組み、FDMの構成に関する現象のモデルを提示した[5]。また、造形パスを最適化することで、多色印刷の品質を改善する取り組みも行われている[14]。

7. おわりに

本稿では、FDMの独自性に注目し、この方式だからこそ実現できる「表現」を追究するために、パラメータ探索のためのシステムと構造を記述するためのシステムを構築した。これらを用いて既存の造形手法を再現するとともに、新たな造形手法のデザインに取り組んだ。今後は、提案システムを洗練させるとともに、造形例と造形手法を充実させ、FDMの独自性を中心とした新たな造形工程の確立へと発展させる。

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] 3Doodler. (2017年10月 確認) <http://the3doodler.com/>
- [2] Agarwala, M. K., Jamalabad, V. R., Langrana, N. A., Safari, A., Whalen, P. J. and Danforth, S. C. Structural quality of parts processed by fused deposition. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 4-19, 1996.
- [3] Ahn, D., Kweon, J.-H., Kwon, S., Song, J. and Lee, S. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 15-16, pp. 5593-5600, 2009.
- [4] Bächer, M., Bickel, B., Whiting, E. and Sorkine-Hornung, O. Spin-it: optimizing moment of inertia for spinnable objects. *ACM Trans. Graph.*, 32, 4, Article 81, 2014.
- [5] Bellini, A. Fused deposition of ceramics: a comprehensive experimental, analytical and computational study of material behavior, fabrication process and equipment design. *Ph.D. dissertation*, 2002.
- [6] Chen, X., Coros, S., Mankoff, J. and Hudson, S. E. Encore: 3D Printed Augmentation of Everyday Objects with Printed-Over, Affixed and Interlocked Attachments. In *Proc. of UIST '15*, pp. 73-82, 2015.
- [7] CNC Kitchen. Multi TONE 3D printing with ANY 3D printer! (2017年10月 確認) <https://www.youtube.com/watch?v=iT4hMpj-2TM>
- [8] Daudén Roquet, C., Kim, J. and Yeh, T. 2016. 3D Folded PrintGami: Transforming Passive 3D Printed Objects to Interactive by Inserted Paper Origami Circuits. In *Proc. of DIS '16*, pp. 187-191, 2016.

- [9] Dolenc, A. and Mäkelä, I. Slicing procedures for layered manufacturing techniques. *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 2, pp. 119–126, 1994.
- [10] Gao, W., Zhang, Y., Nazzetta, D. C., Ramani, K., and Cipra, R. J. RevoMaker: Enabling Multi-directional and Functionally-embedded 3D printing using a Rotational Cuboidal Platform. In *Proc. of UIST '15*, pp. 437–446, 2015.
- [11] 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*, 16, pp. 1–11, 2017.
- [12] Kazi, R. H., Grossman, T., Mogk, C., Schmidh, R. and Fitzmaurice, G. ChronoFab: Fabricating Motion. In *Proc. of CHI '16*, pp. 2175–2185, 2016.
- [13] 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*, Vol. 124, No. 2, pp. 462–472, 2002.
- [14] Hergel, J. and Lefebvre, S. Clean color: Improving multi-filament 3D prints. *Computer Graphics Forum*, 33, 2, pp. 469–478, 2014.
- [15] Herpt, O. Solid vibration. (2017年10月 確認) <http://studiovanbroekhoven.com/solidvibration.html>
- [16] Holloway, A., Mamou-Mani, A. and Kjelstrup-Johnson, K. Project Silkworm. (2017年10月 確認) <http://projectsilkworm.com/>
- [17] Ion, A., Frohnhofen, J., Wall, L., Kovacs, R., Alistar, M., Lindsay J., Lopes, P., Chen, H.-T. and Baudisch, P. Metamaterial Mechanisms. In *Proc. of UIST '16*, pp. 529–539, 2016.
- [18] Garcia, M. J. and Retsin, G. Voxel chair. (2017年10月 確認) <http://www.designcomputationlab.org/voxelchair-v10>
- [19] 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.
- [20] Klein, J., Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Inamura, C., Dave, S., Weaver, J. C., Houk, P., Colombo, P., Yang, M. and Oxman, N. Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2, 3, pp. 92–105, 2015.
- [21] 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.
- [22] Kwon, H., Kaleel, A. and Li, X. CurVoxels. (2017年10月 確認) <http://www.designcomputationlab.org/rc4-curvoxels>
- [23] 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.
- [24] Li, D., Levin, D. I. W., Matusik, W. and Zheng, C. Acoustic Voxels: Computational Optimization of Modular Acoustic Filters. *ACM Trans. Graph.*, 35, 4, Article 88, 2016.
- [25] LIA works. Filament sculpture. (2017年10月 確認) <https://www.liaworks.com/theprojects/filament-sculptures/>
- [26] Mota, C. The Rise of Personal Fabrication. In *Proc. of C&C '11*, pp. 279–288, 2011.
- [27] Mueller, S., Im, S., Gurevich, S., Teibrich, A., Pfisterer, L., Guimbretière, F. and Baudisch, P. WirePrint: 3D Printed Previews for Fast Prototyping. In *Proc. of UIST '14*, pp. 273–280, 2014.
- [28] Ou, J., Dublon, G., Cheng, C.-Y., Heibeck, F., Willis, K. and Ishii, H. Cillia: 3D Printed Micro-Pillar Structures for Surface Texture, Actuation and Sensing. In *Proc. of CHI '16*, pp. 887–896, 2016.
- [29] 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.
- [30] Preece, J., Rogers, Y. and Sharp, H. *Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction*, John Wiley and Sons, 2002.
- [31] Prévost, R., Whiting, E., Lefebvre, S. and Sorkine-Hornung, O. Make it stand: balancing shapes for 3D fabrication. *ACM Trans. Graph.*, 32, 4, Article 81, 2013.
- [32] 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*, 33, 2, pp. 479–486, 2014.
- [33] Roumen, T., Kruck, B., Dürschmid, T., Nack, T. and Baudisch, P. Mobile Fabrication. In *Proc. of UIST '16*, pp. 3–14, 2016.
- [34] Schmitz, M., Khalilbeigi, M., Balwierz, M., Lissermann, R., Mühlhäuser, M. and Steimle, J. Capricate: A Fabrication Pipeline to Design and 3D Print Capacitive Touch Sensors for Interactive Objects. In *Proc. of UIST '15*, pp. 83–91, 2015.
- [35] Simplify3D. Print Quality Troubleshooting. (2017年10月 確認) <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>
- [36] Skouras, M., Thomaszewski, B., Coros, S., Bickel, B., and Gross, M. Computational Design of Actuated Deformable Characters. *ACM Trans. Graph.*, 32, 4, Article 82, 2013.
- [37] Sun, T. and Zheng, C. Computational Design of Twisty Joints and Puzzles. *ACM Trans. Graph.*, 34, 4, Article 101, 2015.
- [38] 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.
- [39] Tanaka, H. and Koda, S. Fabrix - Direct G-Code Editing Tools for Advanced 3D Printing. (2017年10月 確認) <https://www.fabrix.design/>
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Torres, C. and Paulos, E. MetaMorphe: Designing Expressive 3D Models for Digital Fabrication. In *Proc. of C&C '15*, pp. 73–82, 2015.
- [43] 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.
- [44] Umetani, N., Panotopoulou, A., Schmidt, R. and Whiting, E. Printone: Interactive Resonance Simulation for Free-form Print-wind Instrument Design. *ACM Trans. Graph.*, 35, 6, Article 184, 2016.
- [45] Wang, L. and Whiting, E. Buoyancy Optimization for Computational Fabrication. *Computer Graphics Forum*, 35, 2, pp. 49–58, 2016.
- [46] Mark Wheadon. Velocity Painting. (2017年10月 確認) <https://www.velocitypainting.xyz/>
- [47] 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.
- [48] Wohlers, T. Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. *Wohlers Associates Inc.*, Fort Collins, CO. 2017. <https://www.wohlersassociates.com/>
- [49] Zhou, Y., Sueda, S., Matusik, W., and Shamir, A. Boxelization: folding 3D objects into boxes. *ACM Trans. Graph.*, 33, 4, Article 71, 2014.
- [50] クリス・アンダーソン, 関美和 (訳). *Makers 21世紀の産業革命が始まる*. NHK 出版, 2012.
- [51] 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.
- [52] 多木浩二. ベンヤミン「複製技術時代の芸術作品」精読. 岩波現代文庫, 2000.