

# 造形高さや樹脂量の設定による熱溶解積層方式 3D プリンタの表現力拡張

高橋治輝\* 宮下芳明†

**概要.** 熱溶解積層方式 3D プリンタは、薄い層の重なりで立体形状を作り上げており、その層は細い線状の造形物によって構成されている。この細い線の造形のためには、造形時の高さや樹脂量などのパラメータを適切に設定する必要がある。これらが不適切な場合は造形エラーが発生する。一方で、近年ではこの造形エラーを表現力の拡張のために活用する手法群が提案されている。しかし、そのときのパラメータでなぜその構造が造形できるのか明らかにされていない。本稿では、造形時の高さや樹脂量の設定のための関係式を拡張し、押し出された樹脂の振る舞いとその構造について調査する造形実験を実施した。これにより、手法を横断した統一的な表現力拡張が実現する。

## 1 はじめに

今日、3D プリンタを始めとするデジタル工作機器の普及が進んでいる。熱溶解積層方式は、3D プリンタの種類の中で最も有名な方式になっており、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る。特に、3D プリンタの自己複製を目指した RepRap プロジェクト [1] のモデルは、カスタマイズ性に優れており、商用 3D プリンタのベースとしてだけでなく、さまざまなアイデアを実現するための土台として、一般ユーザーや研究者に広く利用されている。

熱溶解積層方式では、ひとつの層が Road [2] と呼ばれる細い線状の構造から作られている。高精度な造形のためには、Road 単位の造形にまで気を配る必要があり、いくつかのパラメータによってその構造を制御しなければならない。パラメータが不適切な場合は造形エラーが発生し、意図した結果を得ることができない。一方で、ひとつの層に詳細にアクセスできる自由度がある、と捉えることもできる。そのため、造形エラーを活用して毛のような構造を造形する手法 [5] や樹脂を不均一に積層した金たわしのような造形物が提案されている [6]。3D プリンタの表現力を高め、多様な造形を可能にすることは、ユーザーが望むもの得るためのワークフローのデザインに相当し、HCI でのデジタル・ファブリケーション研究のひとつのテーマであると言える。こういった手法を用いた表現は、高精度化・高速化が進む他方式との差別化としてだけでなく、熱溶解積層方式 3D プリンタを選択する理由にもなるだろう。

造形エラーを活用する手法では、通常では使用されない特殊なパラメータやテクニックが必要である。それらは手法に依存して決定されており、造形結果との関係や最適値は明らかにされていない。この理

由として、3D プリンタに関するパラメータの多さ、造形エラーの発生原因の多さが考えられる。あらゆるパラメータの検証は事実上不可能であることから、造形エラーについての詳細な議論は困難である。しかし、3D プリンタと制御用のソフトウェアが造形エラーを防ぐように発展することを考えると、パラメータに関する理解や活用方法を整理しておく必要がある。そうでなければ、造形エラーを活用する表現手法や研究が風化され、3D プリンタの可能性や表現力を狭めていくことになるだろう。

本稿では、パラメータの中で造形時の高さや樹脂量の設定に注目する。これらは、安定した造形のために重要なパラメータであり、設定した高さに対応する樹脂量として関係式が定義されている。この関係式を通常の造形では使用されないような範囲・組み合わせに拡張し、樹脂の振る舞いや造形される構造を調査することが本稿の目的である。パラメータの組み合わせ数は多くなるが、これらを Road の造形中に動的に変化させ、それ以外のパラメータを定数として扱うことで効率的にパラメータ空間を探索する。そして、造形結果を構造ごとに分類し、パラメータに対する分布を示す。これにより、手法を横断した統一的な表現力拡張が実現する。

## 2 関連研究

### 2.1 3D プリンタの造形エラー

熱溶解積層方式 3D プリンタは、要求通りの造形結果が得られないような造形エラーを引き起こす。これを防ぐために、造形時のトラブルシューティングガイド [3] などが提供されている。造形エラーは大きく 2 段階に分けることができる。

まず、造形自体が成立せず、立体形状が作れないようなエラーである。例えば、樹脂の不足、不適切な高さでの造形などによって、正しく積層が行えないような状況が考えられる。こういった造形エラーは、3D プリンタの本来の目的とは違ったかたちでユーザ

Copyright is held by the author(s).

\* 明治大学大学院理工学研究科新領域創造専攻

† 明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科

の興味を引いており、造形失敗の様子の共有、原因追求のためのコミュニティが形成されている [4]。また、造形エラーを表現手法として活用する試みも見られる。Laput らは、ノズルから樹脂が溢れたままプリンタヘッドが移動することで、糸のような造形が可能であることに注目し、髪の毛の造形手法を提案している [5]。Blit it [6] は、自社のシステムの中で、The O'Rourke Scrubber という金たわしのような造形物を提供しており、その造形は樹脂を高い位置から押し出すものになっている。Solid Vibration [7] では、造形中にプラットフォームを激しく振動させ、表面にモアレ模様を持った作品を造形している。造形エラーによって作られる造形物は、一般的な造形では不可能な構造やより高精度な構造を持つことがある。例えば、髪の毛の造形手法 [5] では、通常では出力不可能なほど細い構造を造形しており、表面に模様を作る手法 [7] で出力された造形物には、均一の太さで造形したときに生まれるざらつきが見られない。

もうひとつの造形エラーは、表面、寸法精度、強度など、造形品質に関するものである。プロトタイプングを目的とした場合、これらはそれほど重要ではないが、医療目的や安定した構造が要求される製品の Rapid manufacturing [8] の場合は、こういった要件を満たしている必要がある。また、機能を持った造形物を出力する場合は、パーツ同士の噛みあわせや性能など、造形後に正しく機能するかどうかが必要となる。3D プリンタに関する研究の多くは、品質に関する問題を解決することを目的としており、そのためのパラメータ調査や最適化手法について報告している [9]。しかし、造形エラーは防ぐべきものという前提で研究されており、パラメータの調査範囲は限定的である。また、造形エラーを表現のひとつであると捉えた調査も行われていない。

## 2.2 3D プリンタの制御パラメータ

3D プリンタの動作は、さまざまなパラメータの設定で成り立っている。Agarwala らは、このパラメータを operation, machine, materials, geometry の4つのカテゴリに整理しており、それぞれが相互に依存しあうため、同時に最適化される必要があると述べている [10]。パラメータの調査時は、特定の目的を達成するために、造形環境や注目するパラメータのみを変数として設定し、それ以外は定数として扱うという方法がとられる。例えば、表面の品質には積層ピッチの影響が大きく [11][12]、Road 同士の接着や層の構造にはプリンタヘッドの移動経路と速度が影響する [13][14] ことが報告されている。

さらに、3D プリンタの動作や樹脂の振る舞いをモデル化する研究も行われている [15]。Bellini は、樹脂の押し出しと温度変化、造形される Road の性質に関するモデルを提案している [2]。Crockett ら

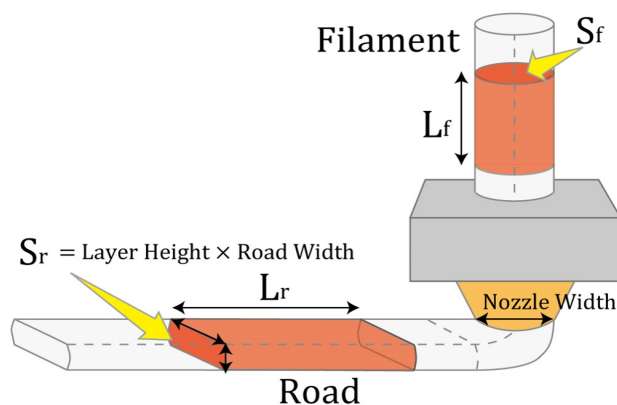


図 1. 樹脂押し出しの様子。

は、造形後に樹脂の広がる様子のモデル化を試みている [16]。また、ABS 樹脂の反り反り [17]、押し出し時にエクストルーダにかかる負荷 [18] など調査されている。こういったモデルは限定された環境で構築されているため、実環境へ適用するには課題も多いが、3D プリンタの基盤となる科学的知見を積み重ねるために重要な研究である。

## 3 3D プリンタの仕組みと樹脂量の決定

### 3.1 造形高さや樹脂量に関するパラメータ

本稿では、RepRap プロジェクトをベースとした熱溶解積層方式 3D プリンタを対象とする。3D プリンタをはじめとするデジタル工作機器の多くは、Gcode と呼ばれる命令群によって制御される。これはスライサと呼ばれるソフトウェアで 3D モデルを処理することで得られる。以下はその一例である。

- 1 G1 Z0.2
- 2 G1 X0 Y0 F3600
- 3 G1 X10 Y10 E4 F1800
- 4 ...

G1 はプリンタヘッドの移動命令であり、いくつかの引数をパラメータとして受け取ることができる。1 行目は、Z 軸方向に 0.2 mm だけ移動する命令で、次の層へ移動する際に挿入される処理である。2 行目は、XY 平面上の座標 (0, 0) への移動 (単位は [mm]) であり、造形開始位置へ 3600 mm/min で移動 (F) することを意味している。3 行目は、樹脂の出力を伴う移動であり、座標 (10, 10) へ樹脂を 4 mm だけ押し出し (E) ながら、1800 mm/min で造形することを意味している。Gcode の大部分はこの命令で占められており、この 1 本の Road の造形を繰り返すことでひとつの層が作られていく。本稿が扱う造形時の高さや樹脂量は、前述の例におけるパラメータ Z と E であり、これらの値を変更することで造形結果を制御する。

### 3.2 樹脂量の決定

ノズルから樹脂が押し出される様子を図 1 に示す。細長い形状に加工された樹脂 (Filament) は、ステッピングモータによって高温に熱されたノズルへと押し込まれる。そして、溶解された樹脂はノズルの先端から Road となってプラットフォームへと押し出され、一定の高さ (Layer Height) と幅 (Road Width) に広がる。

このとき、樹脂量は造形される Road を直方体として近似した体積と押し出す樹脂の体積とが等しくなる、という前提に基づいて計算される。つまり、押し込まれる樹脂の断面積を  $S_f$ 、長さを  $L_f$ 、造形される Road の断面積を  $S_r$ 、長さを  $L_r$  とすると、次の関係が成り立つ [13]。

$$S_f \times L_f = S_r \times L_r \quad (1)$$

この式 1 より、長さ  $L_r$  の Road を造形したい時に押し出すべき樹脂の長さ  $L_f$  を求めることができる。ここで、樹脂の断面積はフィラメント径から、Road の幅はノズルの口径 (Nozzle Width) によって決まる定数であり、高さは設定されたパラメータによって決まる。そして、G1 命令における樹脂を押し出す長さ E は、式 1 の  $L_f$  に等しいため、次のように考えることができる。

$$E = \frac{\text{LayerHeight} \times \text{NozzleWidth} \times L_r}{S_f} \quad (2)$$

本稿では、この式 2 を拡張することで、造形時の高さ と樹脂量に関する調査を実施する。

## 4 関係式の拡張

式 2 は、造形される Road の長さを 1 mm (単位距離) として考えると、Road の高さによる 1 次関数と捉えることができる。図 2 に造形時の高さ と単位距離あたりの樹脂量の関係を示す。図 2 中で太く描画された直線は式 2 の関係である。なお、フィラメント径は 1.75mm、ノズル口径は 0.4mm として計算している。この関係に基づいて、さまざまなパラメータの組み合わせを検証するために、この 1 次関数を極座標形式として考える。このために、 $\theta$  と  $r$  の 2 つのパラメータを定義する。

まず、式 2 による設定値を基準として考えるために、この関係を  $\theta = 45^\circ$  とする。この計算のために、樹脂量に補正値を掛けて  $\theta$  を調整している (補正値は式 2 における  $\text{NozzleWidth}/S_f$  の逆数であり、約 6.013 となる)。そして、任意の値を  $r$  に与えることで樹脂量が算出できる。例えば、造形時の高さが 0.3 mm の場合は、 $\theta = \pi/4$  ( $45^\circ$ )、 $r = 0.3 \times \sqrt{2} = 0.4243$  となる。逆に、 $\theta$  と  $r$  から造形時の高さ と樹脂量を決定する場合は、 $r \cos \theta$  と  $r \sin \theta$  / 補正値をそれぞれ計算すれば良い。この関係を用

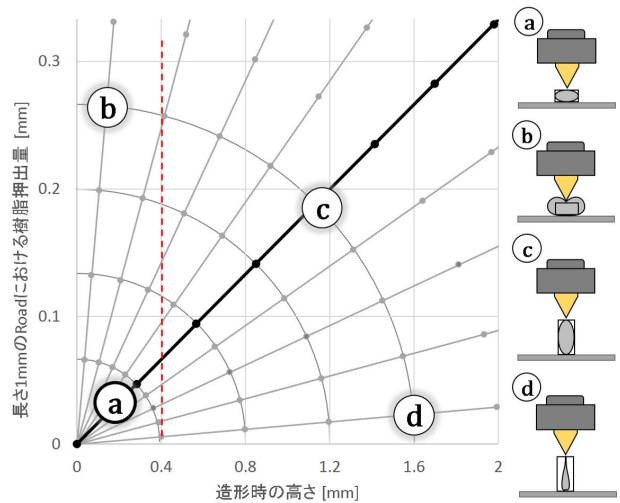


図 2. 造形時の高さ と樹脂量との関係。(a) から (d) はそれぞれ関係での樹脂の押し出され方。

いて、 $\theta$  と  $r$  の値を変更していくことで、パラメータを探索していく。図 2 には  $45^\circ$  を中心とした  $10^\circ$  刻みの直線と、 $r$  の大きさを示す同心円を示した。

図 2 中の a から d は同図の右部と対応しており、各パラメータを選んだ場合の Road の形状の近似と樹脂の様子を示している。まず、(a) は一般的に使用される設定値であり、この周辺であれば安定した Road が造形できる。次に、(b) は高さに対して樹脂が多い状況であり、設定された幅や高さを超えてノズルを包み込むように樹脂が膨らむと考えられる。そして、(c) は式 2 に基づいた設定値であるが、ノズル口径が 0.4mm と一定であることから、高さ方向に長い直方体を造形することを意味している。RepRap プロジェクトのキャリブレーション方法<sup>1</sup>によれば、高さはノズル口径の 80% 以下、幅はノズル口径以上の値から最適なものを設定すると良いとされているが、これを大きく超えるように設定した場合の結果は知られていない。最後に、(d) は高さ方向に長い直方体として近似されており、樹脂の量が不十分という状況である。この場合は、造形自体が上手く行えないことが考えられる。次章では、これらのパラメータを持った Road を実際に造形することで、このときの樹脂の振る舞いと造形物の様子を調査する。

## 5 Road の造形実験

### 5.1 パラメータと実験方法

前述の関係式をもとに、さまざまなパラメータが設定された Road の造形実験を行った。Road の長さは 200 mm、 $\theta$  は  $1^\circ$  から  $90^\circ$  までとし、 $1^\circ$  の刻み幅で 90 本の Road を造形する。 $r$  は 0.1 から 10.0

<sup>1</sup> [http://reprap.org/wiki/Triffid\\_Hunter's\\_Calibration\\_Guide](http://reprap.org/wiki/Triffid_Hunter's_Calibration_Guide)

までとし、Roadの造形中に2mmの造形につき0.1ずつ連続的に増加させていく。

実験用の造形パスを生成するために、指定したパラメータで造形用のGcodeを書き出す実験システムを構築した。システムは、プラットフォームのサイズを考慮して、異なる $\theta$ が設定された12本のRoadを8mm間隔で並べるように生成する。これを1回の造形として、パラメータの変更と造形を繰り返すことで、すべての $\theta$ に対して造形を行っていく。なお、造形時の条件を揃えるため、すべてのRoadは以下の手順に従って造形される。この手順を実現する命令はシステムによって生成され、造形の前処理、後処理として挿入される。

1. 始点に移動。10 mm/sで6 mmだけ押し出す
2. 30 mm/sで3 mmだけ引き戻す
3. 3秒間停止。溢れた樹脂を取り除く
4. 30 mm/sで3 mmだけ押し出す
5. 200 mmのRoadを造形する
6. 30 mm/sで3 mmだけ引き戻す

## 5.2 実験環境

熱溶解積層方式3DプリンタNinjabot NJB-200<sup>2</sup>を使用した。0.4 mm口径のノズルを搭載しており、PLA樹脂、ABS樹脂での造形が可能である。今回の実験では、造形速度も影響を与える可能性があるが、すべての造形を300 mm/minで統一した。なお、最大押出速度がファームウェアの設定により制限されていたため、十分に高速な押し出しができるように不揮発性メモリ(EEPROM)の設定を変更した。これは押出速度の上限を設定するものであり、実際に押し出される量への影響はない。この書き換えや造形の制御には、Repetier-Host<sup>3</sup>を使用した。

樹脂はMakerbot ABS (True Black)を使用し、造形時の温度はノズルを230°C、プラットフォームを100°Cとした。プラットフォームには50 mm幅のマスキングテープを貼り、樹脂の接着のために糊を塗った。Roadはこのテープ幅に合うように造形される。なお、造形時の室温は約25°Cに調整し、湿度は約60%であった。

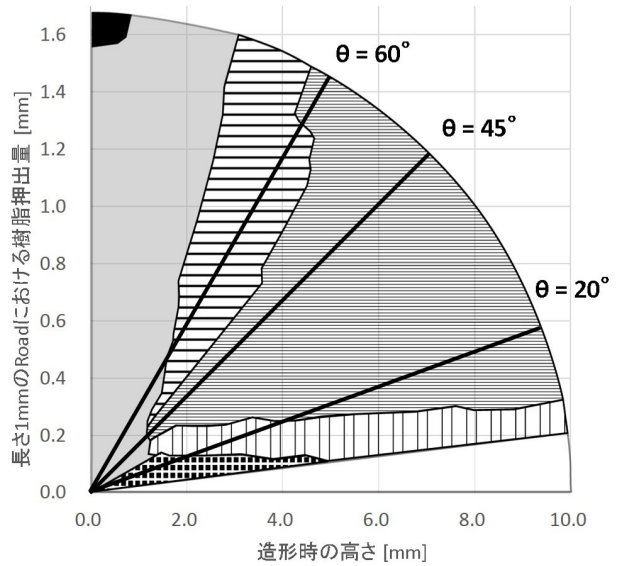


図 3. 造形結果の分類。図中のパターンは図 5 参照。

## 5.3 実験結果

造形に使用されたパラメータと造形結果の分布を図3に示す。この分類は、Road中の構造変化を目視で判断し、その位置を計測した結果に基づいている。図4に60, 45, 20°のパラメータで造形されたRoadに対する計測例を示す(図3中の太線に対応)。得られたRoadは6種類の構造に分類された(図3中の分布と図5で示す構造に対応)。なお、 $\theta < 7^\circ$ のパラメータでは、造形物がプラットフォームに接着せず、プリンタヘッドに引っ張られてしまったため造形不可能として扱った(図3下部の白領域)。

## 5.4 考察

まず、一般的な造形時に使用される高さ、樹脂量を大きく上回るようなパラメータであっても、ほとんどの場合は安定して樹脂が押し出せることがわかる。例外は、樹脂量が極めて多くなる組み合わせの場合であり、このときはエクストルーダを駆動す

<sup>2</sup> <http://ninjabot.jp/product/fdm-200/>

<sup>3</sup> <https://www.repetier.com/>

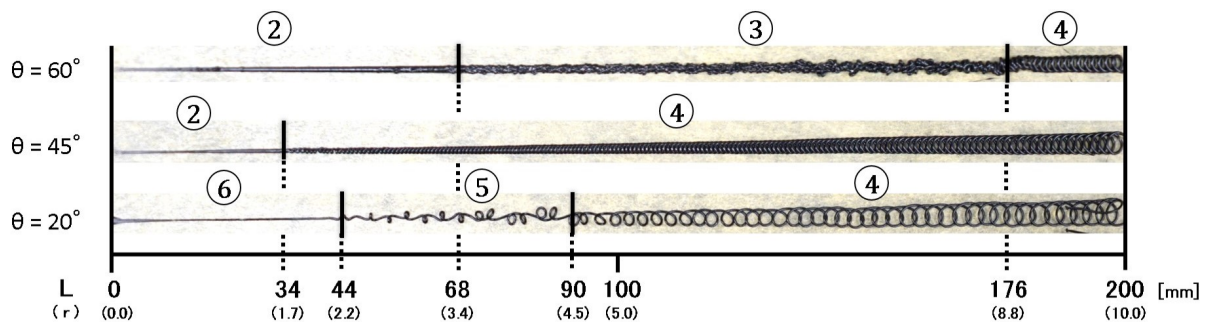


図 4. 造形物の分類。図中の数字は図 5 に対応。

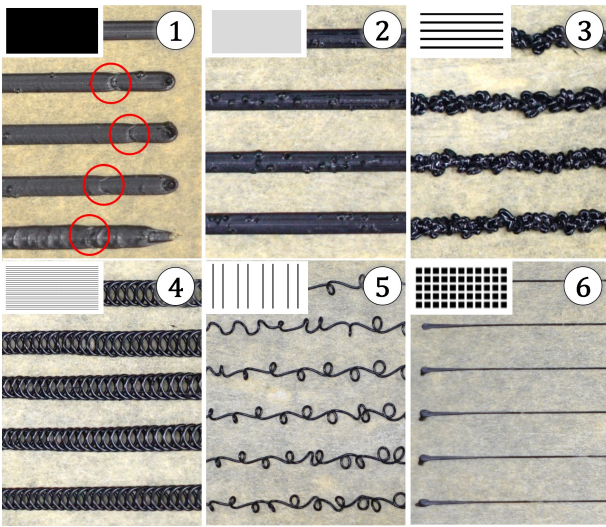


図 5. 造形物の拡大図。

るステッピングモータに脱調が発生していた。これにより、樹脂の押し出しが瞬間的に不安定になり、Road に細くなる箇所が観察された (①)。この現象には、造形速度の影響も大きく、今回の速度 (300 mm/min) を超える設定で造形した場合は、この領域が広がっていくことが想定される。

この脱調が発生しなかった場合、Road として安定した構造を持った造形物が出力される。一般的なパラメータ設定で得られる結果もここに含めている (②)。造形される Road は、樹脂量の増加に従って太くなるが、一部の太い Road では表面にざらつきが見られる (図 5 では、比較的太い部分を抽出している)。この現象は、Road の温度変化と歪みによるものであると考えられる [2]。押し出されたばかりの樹脂は、高温に熱された状態にあり、後から押し出される樹脂によって持ち上げられるように変形する。この変形に耐えられなくなった部分は、気泡が破裂したような跡ができたまま硬化してしまう。

この状態から造形位置を高くしていくと、樹脂は不規則な形状として押し出されるようになる (③)。そして、 $\theta = 60^\circ$  かつ  $r = 8.8$  付近のパラメータになると、④のような「らせん構造」の Road が造形され始める。この構造は、造形結果の分布で広範囲に及んでおり、パラメータの組み合わせによって構造が異なってくる、例えば、図 4 の  $\theta = 20^\circ$  では、より疎ならせん構造が確認できる。このとき、前述の③と同様に、樹脂は高い位置から押し出されるが、硬化までに後の樹脂に押し付けられない、構造を維持したまま順次硬化する、などの条件を満たしていることからこの構造ができあがると考えられる。また、らせん構造には回転方向があり、時計回り・反時計回りにねじれた結果が同程度造形された。それぞれの回転方向は造形中に維持されるが、特に樹脂量が少ない場合は途中で構造が乱れる、回転方向

が逆転するなどの結果も見られた。

さらに樹脂の量が不足していくと、ねじれた紐のような形状になっていく (⑤)。最終的には、樹脂がほとんど押し出されず、プリンタヘッドに引っ張られるような造形になり、3D Printed Hair[5] のように細い毛のような構造ができあがる (⑥)。図 4 の  $\theta = 20^\circ$  は、この④から⑥の構造をすべて持っており、パラメータの変化による樹脂の振る舞いを確認することができる。

## 6 議論

図 3 の分布に従ってパラメータを選択すれば、6 種類の結果を意図的に造形できることが明らかになった。しかし、各構造は直前に造形された部分の影響を受けることから、領域の境界には多少曖昧な箇所が存在する。また、パラメータを極端に変化させた場合、曲線や折れ線のような構造を造形した場合は結果が異なることが予想される。今回の実験では、樹脂や造形速度など、いくつかのパラメータを定数として扱っており、環境の変化による影響は依然として大きいと考えられる。一方で、これらを変化させた場合でも、各構造に対応する分布が変化するのみで、同様な考え方ができるだろう。もし、異なる環境でより詳細な制御を実現したければ、同様な調査を実施してその環境特性を知っておけば良い。

これらの構造を実際に利用していくためには、造形される Road の幅と高さを詳細に調査する必要がある。例えば、図 5②のとき、一部のパラメータで造形時の高さや Road の高さが一致することを確認しているが、幅の広がり方は押し出される樹脂量によって変化する。これを明らかにすることで、各構造を表現手法として活用できるだけでなく、造形中に動的に太さを変更する Adaptive Slicing[19] への応用も期待できる。また、図 5③から⑤の構造は、空中での造形や不安定な造形物への積層が難しいと考えられる。これらをプラットフォーム上以外で造形するためには、平らな物体上での造形やサポート材の付加が必要である。

実験で得られた構造を用いて、実験的に造形を行った例を図 6 に示す。図 6(a) は、造形時の太さを動的に変更して、波打った表面を持った平面を造形した例である。フレキシブル樹脂や透明樹脂を使用すれば、蛇革のような手触り感のあるテクスチャを日用品に貼り付ける、といった使い方ができるだろう。図 6(b) も同様の太さ制御による造形物であるが、壁面で樹脂を溢れさせるように樹脂量を制御している。溢れる位置を制御すれば、表面に文字や模様を付加することができる。これは、図 5②の構造を維持しながら、Road の太さを制御することで実現できる。図 6(c) は、らせん構造を活用した例であり、編みかごのような手触り感のある造形物や、造形物同士の連結などが可能になる。これらは、これまで造

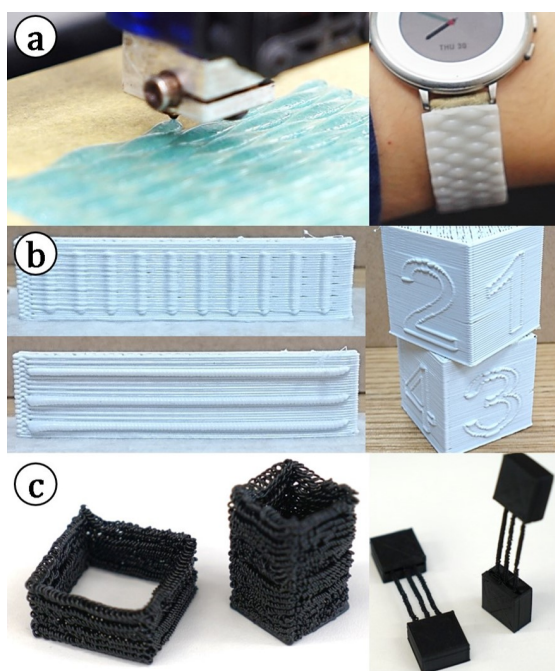


図 6. 応用例。(a) 太さを制御して滑らかな表面を作る。  
(b) 壁面で樹脂量を溢れさせて文字や模様を作る。  
(c) らせん構造の積み上げと造形物の連結。

形エラーとされてきた方法によって造形されている。このように、さまざまな樹脂と造形手法を組み合わせることで、熱溶解積層方式 3D プリントの表現力を大きく拡張することができるだろう。

## 7 おわりに

本稿では、熱溶解積層方式 3D プリントにおける造形時の高さや樹脂量の設定に注目し、パラメータを決定する関係式の拡張と造形実験を実施した。実験結果を 6 つの構造に分類し、これらを作り出すためのパラメータの分布を示した。そして、これまで造形エラーを生むとされてきたパラメータを新たな表現手法のために利用できる可能性を示した。

## 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] R. Jones et al. RepRap - The Replicating Rapid Prototyper, Robotica, Vol. 29, pp. 177-191, 2011.
- [2] A. Bellini. Fused Deposition of Ceramics: A Comprehensive Experimental, Analytical and Computational Study of Material Behavior, Fabrication Process and Equipment Design, PhD dissertation, Drexel University, 2002.
- [3] Simplify3D. Print Quality Troubleshooting.

<https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/> (2016/9/4 確認)

- [4] Epic 3D Printing Fail. <http://epic3dprintingfail.tumblr.com/> (2016/9/4 確認)
- [5] G. Laput et al. 3D Printed Hair: Fused Deposition Modeling of Soft Strands, Fibers and Bristles, In Proc. of UIST'15, pp. 593-597, 2015.
- [6] Blit it. <https://blitit.com/> (2016/9/4 確認)
- [7] O. Herpt. Solid Vibration. <http://studiovanbroekhoven.com/solidvibration.html> (2016/9/4 確認)
- [8] E. Tempelman et al. Manufacturing and Design: Understanding the Principles of How Things Are Made, Butterworth-Heinemann, pp. 198-199, 2014.
- [9] B.N. Turner et al. A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes: II. Materials, Dimensional Accuracy, and Surface Roughness, Rapid Prototyping Journal, Vol. 21, pp. 250-261, 2015.
- [10] M.K. Agarwala et al. Structural Quality of Parts Processed by Fused Deposition, Rapid Prototyping Journal, Vol. 2, pp. 4-19, 1996.
- [11] D. Ahn et al. Representation of Surface Roughness in Fused Deposition Modeling, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 5593-5600, 2009.
- [12] R. Anitha et al. Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modelling, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 118, pp. 385-388, 2001.
- [13] W. Han et al. Tool Path-Based Deposition Planning in Fused Deposition Process, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 124, pp. 237-246, 2002.
- [14] Q. Sun et al. Effect of Processing Conditions on the Bonding Quality of FDM Polymer Filaments, Rapid Prototyping Journal, Vol. 14, pp. 72-80, 2008.
- [15] B.N. Turner et al. A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes: I. Process Design and Modeling, Rapid Prototyping Journal, Vol. 20, pp. 192-204, 2014.
- [16] R.S. Crockett and P.D. Calvert. The Liquid-to-Solid Transition in Stereodeposition Techniques, In Proc. of Solid Freeform Fabrication, Vol. 7, pp. 257-264, 1996.
- [17] T.M. Wang et al. A Model Research for Prototype Warp Deformation in the FDM Process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 33, pp. 1087-1096, 2007.
- [18] N. Venkataraman et al. Feedstock Material Property-Process Relationships in Fused Deposition of Ceramics (FDC), Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, pp. 244-252, 2000.
- [19] M.P. Pulak et al. Slicing Procedures in Layered Manufacturing: A Review, Rapid Prototyping Journal, Vol. 9, pp. 274-288, 2003.

## WISS2016 採録判定時のコメント

---

### 採録区分：ショート採録

### 判断理由：

熱溶解積層方式の3Dプリンタで、従来なら出力エラーとされるような表現を「表現力拡張」と捉えて6種類に分類し、それを安定的に出力可能なパラメタ条件を調査した論文である。興味深い調査結果であり、論文の構成もしっかりしているが、特定機種「ハック」を超える汎用的な知見が十分に示されていないため、ショート採録となった。

---

### レビューサマリ：

#### 全体の構成：

ABS樹脂の熱溶解の特性と3Dプリンタの積層法をうまくハックして、エントリーモデルの熱溶解積層方式(FDM)3Dプリンタにおいて、6種類の手触りや見た目の出力結果を得られるパラメタを調査した論文である。

#### 改良のためのコメント等：

##### ・モチベーションについて：

精度の高いFDMの3Dプリンタや、別の造形方式(レーザー焼結や光学方式)を用いれば、あたりまえに出力できる表現も含まれている点には言及すべきである。これは専門家であれば知っていることなので、先に示すのが建設的かつフェアである。そのうえで、なぜ提案手法のようなことが必要なかを議論したほうがよい。

すなわち、「手軽に入手できる低精度のプリンタで様々な表現を可能にしたい」というモチベーションを最初にはっきりすべきである。例えば、現状の図6をはじめに持ってきて、可能にしたい表現を先に述べるなどの工夫が必要であろう。また、「造形エラー」でなく、「素材性」のような、よりポジティブな用語選択をしたほうがよいという指摘もあった。

##### ・手法について：

分かりやすく書かれている。ただ、特定機種やソフトウェアに関する固有の内容が多く含まれており冗長である(特に、らせん構造の出力に関する説明と議論が長すぎる)。一方で、実際に本手法を活用したいと思った場合にどのようなワークフローになるのかといった説明・議論が足りていない。

##### ・議論と今後の展開について：

今回はNinjabot NJB-200とABS樹脂のフィラメントだけで実験している。WISSのショート採録論文としては十分な知見と言えるが、今後は、他の3Dプリンタ、他の素材のフィラメントの場合どうなるのかといった追加実験を重ねて報告すれば、より汎用性が高く、多くの人が活用できる論文にできるだろう。

---

本論文に対する各査読者の詳しいコメントは以下のページを参照のこと：

<http://www.wiss.org/WISS2016Proceedings/oral/26.html>

---

**\*本ページは論文本体ではありません**

**【造形高さや樹脂量の設定による熱溶解積層方式3Dプリンタの表現力拡張】**