

Road 単位の造形に着目した 熱溶解積層方式3Dプリンタでの質感表現

高橋 治輝^{1,a)} 宮下 芳明^{1,b)}

受付日 2017年4月21日, 採録日 2017年11月7日

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Roadと呼ばれる細い線状の構造によって構成されている。Road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り、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。本論文では、造形時の高さと樹脂量の設定のための関係式を拡張し、Roadの造形中に連続的に変化させるという方法で効率的にパラメータ空間を探索する。この方法を用いて、押し出された樹脂の振舞いとその構造との関係について調査を実施した。造形結果を構造的特徴に基づいて6種類に分類し、各構造を作るためのパラメータを分布として示す。また、実験結果に基づく新しい表現手法の実現可能性と得られる質感を示すために、さまざまな樹脂を用いて造形例を出力した。本手法の知見によって、造形手法を横断した統一的な表現力拡張が実現する。

キーワード: 3Dプリンタ、熱溶解積層方式、デジタル・ファブリケーション、質感表現

A Texture Expression Using Fused Deposition Modeling Focused on Printing Road-level Structure

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

Received: April 21, 2017, Accepted: November 7, 2017

Abstract: Fused deposition modeling (FDM) 3D printers form objects by stacking layers having a linear structure called *road*. To print a fine road, an appropriate choice of parameters for controlling the extruder of a 3D printer is necessary, or printing error occurs. On the other hand, the error is exploited as an expression technique. However, the relationship between the printed structure and the parameters causing the printing error is unclear. In this paper, we focus on the height position of the extruder and the amount of extruded material, and explore the combination of these parameters to enhance the capability of FDM. By extending an equation that calculates the amount of material and by continuously changing these parameters during printing a road, we investigate the behavior and structure of material extruded from various height positions. On the basis of experimental results, the printed structure is classified into six categories according to the structural feature. We describe these structural features and demonstrate examples with new inherent expressions for FDM.

Keywords: 3D printer, fused deposition modeling, digital fabrication, texture expression

1. はじめに

今日、3Dプリンタをはじめとするデジタル工作機器の

¹ 明治大学

Meiji University, Nakano, Tokyo 164-8525, Japan.

a) haruki@meiji.ac.jp

b) homei@homei.com

普及が進み、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おり、熱溶解積層方式(FDM)は、3Dプリンタの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[15]のモデルは、カ

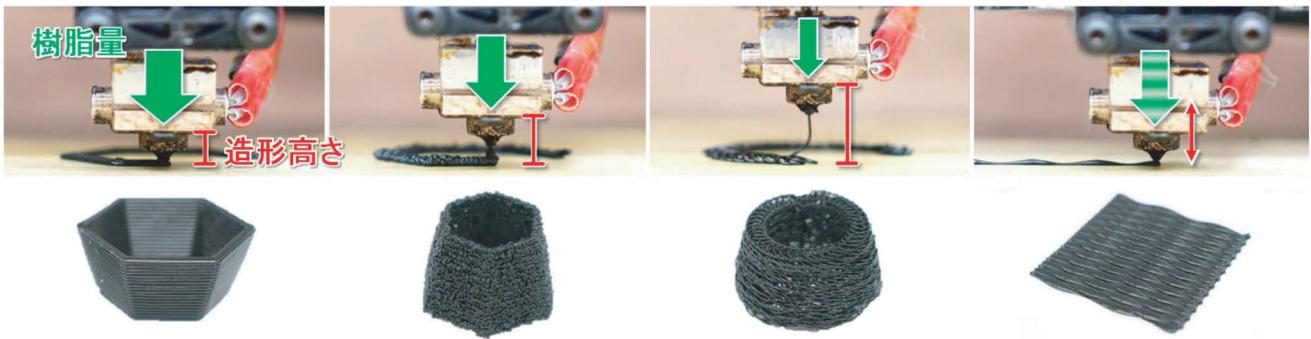


図 1 提案手法を用いた造形例。エクストルーダの高さ位置と樹脂量の組合せにより、多様な表現が可能になる。右端はこれらのパラメータを変化させながら造形を行った様子

Fig. 1 Extrusion state of our technique. We explore the relationship between the combination of parameters and the behavior of extruded materials to extend the expression of the FDM.

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、さまざまなアイディアを実現するための土台として、一般ユーザや研究者に広く利用されている。

本論文では、熱溶解積層方式 3D プリンタでの質感制御の実現を目指して、造形時のエクストルーダの高さ位置と樹脂量という 2 つのパラメータに注目する。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、相互に影響し合う。そのため、ある造形高さが与えられたときに適切な樹脂量を算出するための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・組合せに拡張し、樹脂の振舞いや造形される構造を調査する(図 1)。パラメータの組合せ数は増加するが、これらを Road [4] と呼ばれる基本構造の造形中に連続的に変化させるという方法で効率的にパラメータ空間を探索する。造形結果を構造的特徴に基づいて 6 種類に分類し、パラメータに対する分布を示す。この結果を活用して、これまでの 3D プリンタでは実現困難であった質感や素材性を持った造形例を出力し、本研究が可能とする質感表現について述べる。本研究の知見により、さまざまな造形手法を横断した統一的な表現力拡張が実現する。

著者らはこれまで、パラメータと造形物との関係を調査し、この手法によって実現する表現について報告している[30], [31]。本論文は、これらの報告をまとめあげ、このような造形手法を熱溶解積層方式 3D プリンタで実現する意義、樹脂や 3D プリンタなどの環境差に関する問題について整理したものである。さらに、本論文の知見を質感表現に利用するためのデザインシステムと、これを用いて作成した造形例について述べる。

2. 背景および研究目的

2.1 熱溶解積層方式の造形能力

熱溶解積層方式は、薄い層を積み上げることで立体形状を作り上げており、1 つの層は Road 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、パラメータ設定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、各層を構成する基本構造にまでアクセス可能な自由度がある、ととらえることもできる。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[19] や樹脂を不均一に積層した「たわし」のような造形物が提案されている[5]。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、ユーザが望むものを得るためにワークフローデザインに相当し、HCI でのデジタル・ファブリケーション研究のテーマの 1 つであるといえる。

造形エラーを活用する手法では、通常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。一方で、あらゆるパラメータの組合せを検証することは不可能であることから、パラメータの最適値や造形結果との関係は明らかにされていない。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、熱溶解積層方式の造形能力に関する理解やパラメータ設定方法の整理が重要である。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。本研究は、パラメータと造形結果との関係を網羅的に調べることで、熱溶解積層方式の表現力を拡張することを目的としている。

2.2 他方式 3D プリンタと熱溶解積層方式との違い

光造形方式(SLA) やレーザ焼結方式(SLS)などの 3D プリント方式が、熱溶解積層方式とともに発展している。これらの魅力は高い造形能力にある。たとえば、光造形方式は、光硬化性樹脂で滑らかな表面を造形できるだけでなく、大幅な高速化が実現されている[7]。また、レーザ焼結方式は、高精度・高耐久性のある造形物を出力できるほか、

2014年に特許期限の満了を迎えたことでも注目されている。こういった方式と比較すると、熱溶解積層方式の造形品質は遠く及ばないのが実情である。

一方で、光造形方式やレーザ焼結方式には、高い導入・運用コストがともない、環境の構築や維持、樹脂の取扱いも容易ではないという課題がある。つまり、熱溶解積層方式は高精度な造形を追い求めるのではなく、その扱いやすさとコストの低さを最大限に活かし、パーソナル・ファブリケーションを先導するような発展をとげるべきである。Roumenらは、小型の熱溶解積層方式3Dプリンタと、この方式と同じ原理の手持ちタイプのエクストルーダをもとにMobile Fabrication[24]を提唱した。ユーザのニーズに即座に答えるものづくり環境と3Dプリンタを携帯する未来ビジョンに基づいており、熱溶解積層方式の優位性を活かした応用事例である。

本論文では、熱溶解積層方式の表現力に着目し、図1のような多様な質感表現を実現する。本手法によって得られた造形物は、高精度な方式に匹敵する、あるいはこの方式でなければ困難な質感と構造を持つ。こういった表現力の充実は、高精度化・高速化が進む他方式との差別化や熱溶解積層方式3Dプリンタを選択する理由になるだろう。また、図1上部の様子から分かるように、これらの質感は造形時に付加される。つまり、単一の3Dモデルからさまざまな質感を持った造形物を作り出すことができる。高精度な他方式は、その精度がゆえに3Dモデルの細部や造形可能性を加味した作り込みが必要になり、パラメータの制御のみで実現できる提案手法とは大きく異なる。

2.3 3Dプリンタと樹脂の性能差

多くのメーカーが熱溶解積層方式3Dプリンタの開発に取り組んでおり、その種類や特徴は多岐にわたる。そのため、3Dプリンタの性能差は大きく、特定の造形手法があらゆる環境に対応しているか否かを調査しつくすことは困難である。本論文では、3Dプリンタの詳細な制御を実現するために、RepRapプロジェクトをベースとした熱溶解積層方式1台を用いて手法の構築と実験を実施するが、同時に次の2つの取り組みにより提案手法の汎用性を示す。

まず、本論文中で主に使用する1台を含めた全3台の3Dプリンタに対して提案手法を適用する。本研究の対象であるエクストルーダの高さと樹脂押出量は、エクストルーダによって制御されるが、この部分の原理は、高温で溶解した樹脂をきわめて細いノズルから押し出すというもので、ほぼすべての熱溶解積層方式に共通している。また、本論文で扱う3台の3Dプリンタをはじめとして、ほとんどの3Dプリンタは0.4mm口径のノズルを標準のサイズとして搭載しており、この条件での調査結果は十分に有益なものであると考えられる。一方で、樹脂を送り込む方式は、樹脂を直接ノズルに送る（ダイレクト）方式とチューブ状の

ガイドを通して送る（ボーデンチューブ）方式があるが、本論文で扱う3Dプリンタはこの両方式を含む。これらに適用することで、同様な現象が生じることを観察する。

そして、パラメータ設定のための関係式を示すことで、3Dプリンタの種類が変わってもその特性を効率的に調査できるようになる。これによって、利用する3Dプリンタに対応した調査が可能となり、性能差を埋めるような調整に役立てられると考えている。この式は、従来の関係式の拡張であり、パラメータの選択と調整を容易にするものである。このような調整は、安定した造形のためのガイド[27]に従って試行錯誤するような作業に等しく、提案手法を利用するための必要条件であると考えている。

一方で、使用する樹脂の特性による差は調査に値する。たとえば、粘度が低く、わずかな押し出しや造形の停止で溢れ出すような樹脂の場合は、造形結果が異なることが予想される。そのため、実験では広く利用されているABS樹脂とPLA樹脂を採用し、造形例では色の異なるPLA、ABS樹脂、透明PLA樹脂、フレキシブル樹脂、ウッドライク樹脂などを用いた場合の結果を示す。

3. 関連研究

3.1 3Dプリンタの造形エラー

熱溶解積層方式3Dプリンタは、望んだ形状を得られないような造形エラーを引き起こすことがある。この造形エラーを防ぐために、3Dプリンタのメーカーやソフトウェアの開発元は、高精度な造形のためのガイドを提供している（たとえば、Simplify 3Dのトラブルシューティングガイド[27]）。造形エラーは大きく2つの段階に分けることができる。

まず、樹脂の不足やパラメータ設定の不備によって、造形自体が成立しない、立体形状が作れないような状況である。ユーザは前述のガイドなどを参照しつつ、このエラーを防ぐ必要があり、さもなければ樹脂の浪費や3Dプリンタの故障などを招く。一方で、造形エラーは3Dプリンタの本来の目的とは違った形でユーザ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[10]。

さらに、この造形エラーを新しい表現手法として用いる手法も提案されている。Laputらは、髪の毛のように細い構造を造形する手法を提案している[19]。この手法は、ノズルから溢れる樹脂が糸を引く造形エラーStringing(Oozingとも)を活用したものである。Kanadaは、3Dプリンタを用いたジェネラティブアートの出力を試みている[17]。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から成り立っており、樹脂量に関する造形エラーOver/Under extrusionをうまく制御した手法であるといえる。Reinerらは、2色造形を活用して色調変化を表現する手法を提案している[23]。一定の周期で揺らした外壁を

基本とし、異なる色を互い違いに積層していくことで、表面に見える部分の色合いを制御する。この外壁の構造は、層のズレに関する造形エラー *Layer shifting* を制御したものである。

Blit it Inc. [5] は、自社システムの中で「the O'Rourke Scrubber」という「たわし」のような造形物を提供している。この造形物は、樹脂を高い位置から不規則にプラットフォームへと落としていくことで作られる。また Klein らは、ガラスを素材とした熱溶解積層方式 3D プリンタを構築し、押し出す高さを制御することで「Coiling pattern」を作り出せることを報告している [16]。Solid Vibrations [14] は、プラットフォームを振動させることで造形物の表面に模様を作り出す造形手法である。振動によって、樹脂の溢れ具合が周期的に変化するため、モアレ模様のような表現が可能になる。これらは意図的に不安定な状況を作り出し、それを巧みに制御することで新たな表現を可能にしている。

このように造形エラーを活用することで、さまざまな表現、造形物が可能になることが知られている。また、造形エラーによって生み出された造形物は、しばしば通常の造形物よりも高精度な部分を持つことがある。たとえば、一般的な方法で積層造形すると、造形物の表面に階段のようなざらつき (Staircase effect [9]) が現れるが、樹脂の溢れを活用して太い部分を一度に造形すると、こういったざらつきが目立たなくなる [29]。

もう一方のエラーは、表面のざらつきや寸法精度、耐荷重などの品質に関するものである。特に、機能部品の造形にはさまざまな要件が満たされる必要があり、たとえば、造形後に正しく噛み合うか、組み上げることができるか、デザインどおりに動作するか、などがあげられる。多くの研究者や 3D プリンタのメーカーはこの問題の解決に取り組んでおり、パラメータ設定と造形物との関係についての調査、その結果に基づいた最適化手法の研究がさかんに行われている [34]。しかし、これらの研究は、造形エラーを避ける目的であるため、限定的なパラメータのみしか調査されてこなかった。さらにいえば、造形エラーを新しい表現方法の 1 つと見なした調査は行われていない。

3.2 3D プリンタのパラメータ

3D プリンタの動作にはさまざまな変数が関係しており、これらは、パラメータを設定することで制御する必要がある。Agarwala らは、この変数を 4 つのカテゴリ (Operation-, Machine-, Materials-, and Geometry-specific parameters) に分類しており、これらが互いに影響しあうため、同時に最適化される必要があると述べている [1]。

パラメータを調査する場合は、達成目標を設定したうえで、注目するパラメータを変数、それ以外を定数として扱う方法がとられる。たとえば、積層ピッチが表面のざらつ

きに有意な影響を与え [2], [3]、造形時間と造形パスが各層の構造や Road どうしの接着に影響を与える [13], [28] ことが明らかにされている。こういったパラメータの調査は、商用のプリンタに対してだけでなく、オープンソースの 3D プリンタに対しても実施されている [11], [18]。

さらに、造形工程や樹脂の振舞いをモデル化する研究も行われている [33]。こういったアプローチは Process Modeling と呼ばれており、3D プリンタの基礎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とされている。Bellini は、熱溶解積層方式に関する包括的な実験と調査を行っており、溶解した樹脂の振舞い、ノズルから押し出される樹脂の広がり方、樹脂の温度変化などに関するモデルとシミュレーション方法を提案した [4]。さらに、押し出し後の樹脂の様子 [8]、ABS 樹脂の変形 [36]、エクストルーダに押し込まれる樹脂にかかる圧力 [35] など、さまざまな現象について調査とモデル化がなされてきた。こういったモデルは、限定的な環境を想定して構築されており、実環境に応用するためには課題も多いが、デジタル・ファブリケーションに関する研究として特に重要である。

3.3 3D プリンタを用いた表現

HCI や CG の分野では、3D プリンタで新しい構造の造形を実現し、この構造を用いて表現を行ったり、作業の効率化を図ったりする研究がさかんに行われている。

Mueller らは、造形物をワイヤフレーム構造で出力することで造形時間の短縮、試行錯誤のサイクルの高速化を実現した [20]。Tactum [12] は、人間の前腕をキャンバスとして利用するモデリング環境であり、個人の形状に合った複雑かつジェネラティブな構造デザインを可能にした。Torres らは、造形物の見た目や手触り感の表現に注目し、感触のデザインを支援する HapticPrint [32] を提案した。さまざまなテクスチャを造形物の表面に貼り付けるような形で手触り感を制御することが可能である。Schüller らは、視点位置によって見え方の異なる造形物をデザインする手法を提案しており、Mimicking surfaces (bas relief) の表現を 3D プリンタで実現した [25]。Cillilia は、高解像度の光造形 3D プリンタを駆使し、前述の髪の毛の造形 [19] と同様な造形物の出力を実現している [21]。この構造は、造形の表現を拡張するだけでなく、センサやアクチュエータとしても機能する。高解像度 3D プリンタは、変形可能な微細構造の造形も可能にする [26]。この構造は、メタマテリアルとも呼ばれており、近年注目されている造形物の 1 つである。これらの研究は、3D プリンタや造形物とのインタラクションを実現するものであり、各手法における 3D プリンタのパフォーマンスや原理を理解するためには、パラメータに関する包括的な調査が求められる。

4. 熱溶解積層方式の工程概要

4.1 Gcode とパラメータ

本論文では、RepRap プロジェクトをベースとした Gcode の受け取りが可能な熱溶解積層方式 3D プリンタを対象とする。Gcode は 3D プリンタを制御するための一連の命令であり、スライサソフトウェアで 3D モデルを処理することで得ることができる。以下に、Gcode の一例を示す。

```

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

```

G1 はエクストルーダを制御するための命令であり、いくつかのパラメータを引数として受け取る。1 行目は、Z 軸方向への移動を意味しており、このような命令は各層の造形開始時に挿入される。2 行目は、XY 平面上の水平な移動を特定の速度を移動することを意味しており、3 行目はこの移動に樹脂の押し出し（造形）がともなっている。具体的には、目標地点（10 mm, 10 mm）に 4 mm の樹脂を押し出しながら、1800 mm/min で移動することを指示している。Gcode のほとんどの部分はこの移動命令 G1 で構成されており、1 つの命令で造形される Road を繰り返し造形し続けることで、立体形状を作り上げていく。本論文では、造形中のエクストルーダの高さ位置と樹脂量に注目するが、これらは G1 命令中のパラメータ Z [mm] とパラメータ E [mm] にそれぞれ対応している。この値を変更することで、任意のパラメータの組合せでの造形を実現する。

4.2 樹脂量の計算

図 2 に、ノズルから押し出された樹脂の状態を示す。フィラメント状に加工された樹脂は、エクストルーダ内のステッピングモータによって、ノズルへと押し込まれる。そして、取り付けられたヒータの熱によって溶解されたのち、ノズルの先端から押し出される。押し出された樹脂は一定の大きさ（図 2 中の Layer Height と Road Width）になり、プラットフォーム上で Road を形作る。ここで、押し出すべき樹脂量は、押し出し前後の樹脂の体積が等しくなるという関係に基づいて計算される。したがって、押し込まれるフィラメントの断面積を S_f [mm²]、長さを L_f [mm] とし、造形される Road の断面積を S_r [mm²]、長さを L_r [mm] とすると、次の関係が成り立つ。

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

式 (1) より、長さ L_r の Road を造形するときに押し出すべき樹脂の長さ L_f を算出することができる。ここで、フィラメントの断面積 S_f は、環境によって決まる定数である。そして、多くのスライサソフトウェアでは Road Width が Nozzle Width と同一幅になると仮定して近似計算されて

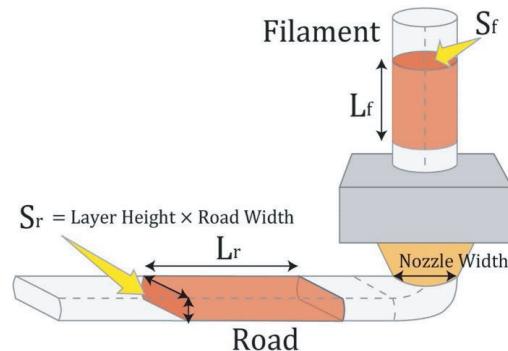


図 2 樹脂を押し出す様子と名称

Fig. 2 Schematic of the extrusion state.

おり、Nozzle Width も使用する 3D プリンタによって決まる定数である。また、Layer Height はスライス時に与えられるパラメータで決定される。最後に押し出すべき樹脂の長さ L_f は前述の Gcode 中のパラメータ E に等しいため、式 (1) は次のように変形することができる。

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

本論文では、式 (2) における Layer Height を造形時の高さ位置として扱う。次章では、この式の拡張と広範囲のパラメータ空間を探索する方法を述べる。

5. 樹脂量設定式の拡張

造形する Road の長さ L_r を 1 mm（単位長さ）とすると、式 (2) は Layer Height に関する 1 次関数ととらえることができる。図 3 は、この関係をエクストルーダの高さと樹脂押出量の関係として示したものである。図中の直線が式 (2) と対応している。なお、この関係は、1.75 mm 径の樹脂と 0.4 mm 口径のノズルより計算されている。本論文の目的は、この関係を基準としてより広範囲なパラメータ空間を探索することである。たとえば、この式 (2) はどの範囲まで有効なのか（図 3c）、パラメータ間の比が異なる場合はどうなるのか（図 3b, d）などの疑問が生じるが、こうしたパラメータは従来の方法では採用されがない組合せである。

こういった値をとりうるように式 (2) を拡張するため、新たに θ [°] と r [mm] の 2 つの媒介変数を定義する。 θ は、この関係式の傾きに対応する変数であり、樹脂量と造形高さの比を表現する。ここでは、便宜的に 45° ($\pi/4$ [rad]) を標準的な比率とした（このとき、樹脂量に補正值をかけることでグラフを傾ける際の計算を調整している。補正值は式 (2) 中の Nozzle Width/S_f の逆数であり、今回の場合はおよそ 6.0 となる）。 r は、ある θ によって決まる関係式がとりうる値の範囲であり、この値を大きくしていくことは、理想的なパラメータからの逸脱具合であるととらえられる。

これらを用いて式 (2) を表現し直すことで、次のような

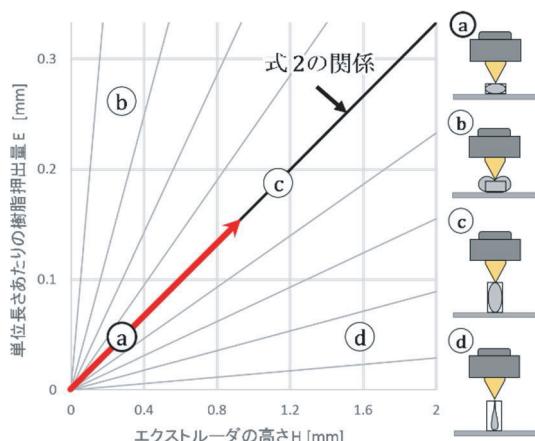


図 3 エクストルーダの高さと樹脂量の関係 (0.4 mm 口径のノズルと 1.75 mm 径の樹脂を用いた場合). 従来の設定で用いられている関係は太線で図示. 右部の a から d はそれぞれの組合せを選んだ場合の造形状態

Fig. 3 Relationship between the height position of the extruder and amount of materials: 0.4-mm nozzle width and 1.75-mm filament diameter. The traditional relationship is shown by a bold line. Extrusion state of each parameter combination shown at the right side (a)–(d).

点で効率的な調査が行える。まず、ある θ を決めて、造形中に r を増やしていくという方法で、パラメータ変化を 1 本の Road の造形に埋め込むことができる。これによって、パラメータの組合せ数に対する造形回数を削減することができる。この造形は、図 3 のグラフをそのままプラットフォーム上に造形するような状況に相当し、図中の矢印が示すような方向にパラメータをとりながら造形が行われる。次に、造形開始地点 ($r = 0$) では、樹脂量と造形高さが 0 となり、必ずプラットフォームに接地する。これはすべての造形の開始地点の条件を統一することができるこ^トを意味する。最後に、 r が 0 に近いときほど設定されるパラメータが密になる。従来の造形で使用されるパラメータは、造形高さが低い場合に集中しており、3D プリンタのパラメータとして重要な領域を重点的に調べることができる。

ここで、 H をエクストルーダの高さ位置 [mm]、 E を単位長さあたりの樹脂押出量 [mm] とし、前述の θ と r を用いて式 (2) を書き直すと以下のような式となる。この式 (3)、(4) を用いることで、図 3 中の a から d のようなパラメータの組合せをとらせることができる。

$$H = r \cos \theta \quad (3)$$

$$E = r \sin \theta \times \frac{\text{Nozzle Width}}{S_f} \quad (4)$$

図 3 の右部は、このパラメータを選択したときのノズル周りの状況に対応しており、Road の近似された形状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の 1 つであり、この周辺であれば安定した Road が造

形できることが分かっている。次に、b は高さ位置に対して樹脂が多い状況であり、ノズルを包み込むように樹脂が広がると考えられる。そして、c は式 (2) に基づいた設定値であるが、ノズル口径は一定であるため、高さ方向に長い直方体を造形している状況として近似される。RepRap プロジェクトのキャリブレーション方法^{*1}によれば、積層ピッチはノズル口径の 80%以下に設定するとよいとされているが、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、さらに樹脂の量が不十分という状況である。この場合は、造形自体がうま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用いて実際に Road を造形し、樹脂の振舞いと造形物の構造を調査する。

6. Road の造形実験

6.1 実験デザイン

前述の式 (3)、(4) を用いてパラメータ空間を探索するため、Road の造形実験を実施した。Road の長さは X 軸方向に 200 mm (プラットフォームの限界幅)， θ は便宜的に 1° から 90° までとし、1° の刻み幅で合計 90 本の Road を造形する。 r は 0.1 mm から 10.0 mm までとし、Road を 2 mm 造形するたびに 0.1 mm だけ r の値を増加させる。実験には、ABS 樹脂 (MakerBot True Black ABS) と PLA 樹脂 (Polymaker PolyMax PLA Black) を使用した。造形速度は、いずれの樹脂の場合も 300 mm/min に固定したが、速度による影響を観察するために、ABS 樹脂に対してのみ 600 mm/min の速度設定でも造形を行った。

この造形パスを生成するため、指定したパラメータで Gcode を書き出す実験システムを実装した。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 θ が設定された 5 本の Road を 8 mm 間隔で並べるように生成する。この造形とパラメータの変更とを繰り返すことで、すべての θ に対応する Road を造形する。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。

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。

6.2 実験環境

熱溶解積層方式 3D プリンタの Ninjabot NJB-200^{*2}を使用した。このプリンタは、0.4 mm 口径のノズルを搭載しており、ABS 樹脂、PLA 樹脂での造形が可能である。ま

^{*1} http://reprap.org/wiki/Triffid_Hunter's_Calibration_Guide

^{*2} <http://nинjабот.jp/product/fdm-200/>

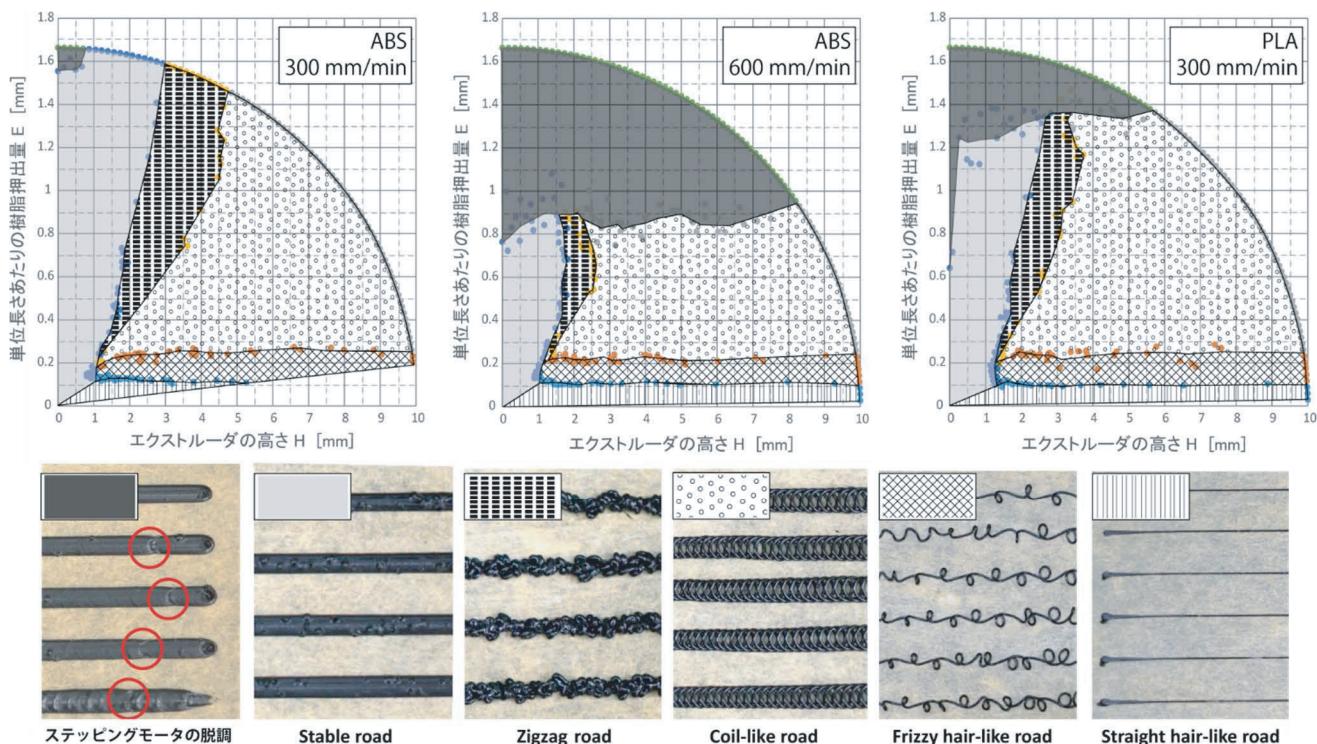


図 4 パラメータに対する造形結果の分布図（上部）と造形結果の分類（下部）。なお、下部に示した造形物は ABS 樹脂を 300 mm/min で造形した結果から抜粋しており、それぞれの左上の記号は分布図の凡例である

Fig. 4 (Top) Distribution of the printed structure. (Bottom) Printed objects classified into six categories.

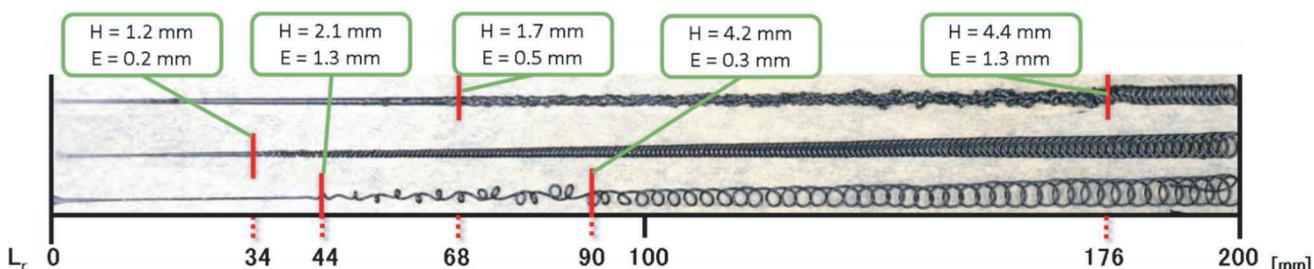


図 5 Road 中の構造の変化 (ABS 樹脂を 300 mm/min で造形した結果から抜粋)。 L_r は Road の長さであり、 H はエクストルーダの高さ、 E は単位長さあたりの樹脂量である

Fig. 5 Variation in the road structure (ABS at 300 mm/min).

た、エクストルーダは、樹脂がノズル部分に直に押し込まれるダイレクト方式である。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^{*3}を使用した。

造形時の温度は、ABS 樹脂の場合はノズルを 230°C、プラットフォームを 100°C、PLA 樹脂の場合はノズルを 190°C、プラットフォームを 50°C とした（いずれも樹脂の推奨設定温度）。造形を安定させるために、プラットフォー

ムに 50 mm 幅のマスキングテープを貼り、接着のために糊を塗った。また、造形時の室温は約 25°C に調整し、このときの湿度は約 60% であった。

6.3 実験結果

造形された Road を構造的特徴に基づいて 6 種類に分類した（図 4 下部）。図 4 上部には、使用されたパラメータに対する構造の分布を示した。横軸がエクストルーダの高さ、縦軸が単位長さあたりの樹脂押出量のパラメータに対応しており、分布中のパターンは下部の凡例と対応している。この分類は、Road 中の構造変化を目視で判断して、その位置を計測した結果に基づいている。図 5 に、ABS 樹脂（300 mm/min）で造形された Road に対する計測例と、

^{*3} <http://www.repetier.com/>

構造が変化した位置のエクストルーダの高さ H と単位長さあたりの樹脂押出量 E を示す。

6.4 Road の特徴

造形された構造の特徴と造形時の樹脂の振舞いを、図 4 下部の分類ごとに分析する。

6.4.1 ステッピングモータの脱調によるエラー

まず、一般的に使用されるパラメータの範囲を大きく超過するような場合であっても、3D プリンタは樹脂を押し出し可能であることが分かる。例外は、樹脂量がきわめて多くなる組合せの場合であり、エクストルーダを駆動するステッピングモータに脱調が発生した。このとき、樹脂の押し出しが部分的に不安定になり、Road に細い部分や樹脂のムラが確認された。この現象には、造形速度も影響を与え、速度の上昇につれてこの構造を生む領域が拡大していく(図 4 の ABS 樹脂を 600 mm/min で造形した場合を参照)。PLA 樹脂の場合もこの領域が同速度の ABS 樹脂に比べて広くなっているが、これは造形時の温度とそれによる粘性の変化が影響していると考えられる(PLA 樹脂は 190°C で造形を行った)。また、脱調が発生したときの樹脂量を調べていくと、エクストルーダの押出限界速度を推定することができる。たとえば、本造形実験で使用された 3D プリンタ (NJB-200) は、およそ 11 mm³/s までであれば ABS 樹脂を安定して押し出すことが可能であることが分かった。

6.4.2 Stable road

ステッピングモータの脱調が発生しなければ、安定した形状の Road を造形することができる。そのため、従来のパラメータで造形されるような形状もこのカテゴリに分類されている。また、樹脂量の増加に従って、造形される Road も太くなっていく。しかし、ABS 樹脂で造形された太い Road には、表面にざらつきが見られた(図 4 では比較的太い部分を抽出している)。このざらつきは、温度変化と Road の変形によるものと考えられる[4]。押し出された直後の樹脂は高温に熱されており、あとから出てくる樹脂に押し上げられるように変形する。この変形に耐えられない部分には、気泡が破裂したような跡ができあがり、そのまま硬化してしまう。一方で、PLA 樹脂の場合はこのようなざらつきは確認されなかった。

6.4.3 Zigzag road

造形高さが上昇していくと、樹脂は不均一な形状で押し出されていく。このような形状は、従来のパラメータでは発生せず、また明らかに造形エラーと見てとれる形状をしている。しかし、特徴的な見た目や質感が実現できているだけでなく、高精度な 3D プリンタであっても作り出すことが難しいランダムな構造が得られている。また、造形時の振舞いも安定しており、新たな構造として利用可能であると判断した。この構造を用いたデザインシステムについて、次章で詳細に述べる。

6.4.4 Coil-like road

造形高さに対する樹脂量が減少していくと、螺旋状に捻れた構造が造形され始める。これは Klein らのガラスを素材とした 3D プリンタ [16] でも報告された形状である。Coiling と呼ばれる現象であり、ノズルから紐状に押し出された流体がプラットフォーム上でねじれるような形状を作る[6]。このカテゴリは広範囲にわたっており、パラメータの組合せによって捻れの密度や大きさが異なる。たとえば、図 5 に示した Road は、いずれも螺旋構造を持っているが、疎密具合は異なっていることが確認できる。この構造が造形されるとき、前述の Zigzag road と同様に、樹脂は高い位置から押し出されるが、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るると考えられる。また、螺旋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。

6.4.5 Frizzy hair-like road

樹脂の減少にともなって、螺旋構造の Road は髪の毛のような形状へと変化していく。次項で述べる構造と区別するために、縮れた髪の毛のような構造として分類した。この構造は、図 4 の分布中で長方形の領域を作っており、単位長さあたりの樹脂量に依存して作られていることが分かる。

6.4.6 Straight hair-like road

最終的に、わずかな樹脂がエクストルーダによって引っ張られることで、Laput らによって提案された髪の毛構造ができる[19]。この構造の造形方法に関しては、先行研究で十分に議論されているが、本論文ではエクストルーダの高さ位置と樹脂量の設定との関係に基づいて再現することに成功したといえる。この構造が造形されるとき、ほとんどの部分は空中にできるため、Road の始点はプラットフォームに接着しており、エクストルーダの移動によって引き剥がれない、といった要件を満たしている必要がある。また、造形速度が遅い場合、細い部分が焼き切れる現象が確認された。特に、ABS 樹脂を 300 mm/min で造形した場合に顕著に現れており、樹脂量が少ないパラメータでは安定した Road を得ることができなかった。

前項で述べた構造と同様に、髪の毛状の造形物は樹脂量に依存しており、分布中には長方形の領域が確認できる。これは、一定以上の高さで造形すれば、樹脂が自然に引き伸ばされてこの構造が生まれることを意味している。同様な造形手法を提案した先行研究 [19] は、樹脂を一定量押し出した後に、ノズル先端で引き伸ばすという方法であり、樹脂量についての指摘はない。本実験の結果はこのような構造を作る際の樹脂量についての情報を示している。

7. デザインシステム

実験で得られたパラメータ設定を活用することで可能となる表現を示すために、3つのデザインシステムを実装した。このシステムの実装のためには、いくつかの追加パラメータを前もって調査しておく必要がある（図6）。たとえば、Roadを並べるように造形する場合は1本あたりの横幅、積層する場合は高さが必要である（6章で調査したパラメータは押し出すときの高さであり、Road自体の高さとは異なる）。また、複雑な3Dモデルを処理する場合は、空中に突き出す部分（オーバーハング）は何度まで許容するか、橋のような構造（ブリッジ）はどれくらいの長さまで造形可能か、なども調査する必要がある。そのため、ここでは使用するパラメータの組合せを限定し、そのパラメータで作られた造形物の構造を事前に測定した結果を用いる。また、本デザインシステムを用いて得られた結果は、次章で実例の写真とともに紹介する。

7.1 Zigzag roadを利用するスライサの実装

まず、実験で得られたパラメータを使用して、3Dモデルを処理するためのスライサソフトウェアを実装した。このスライサは、入力された3Dモデルとパラメータを用いて、Zigzag roadで構成される造形パスへと変換するものである。ユーザは、システムに3Dモデルを読み込ませ、本研究で示したパラメータと図6に示した追加パラメータを入力することで、従来のスライサソフトウェアと同様にGcodeを得ることができる。システムは、与えられた3Dモデルをパラメータに従ってスライスし、各層にサポート、内部構造が必要かどうかを調べていく。このとき、サポート構造は一般的な太さのRoadで付加され、造形後に取り除くことが可能である。なお、現在の実装では、内部構造はつねに100%の密度で埋めるようにしている。図7に、この処理の様子と実際に生成されたGcodeのプレビュー、造形後の様子を示す。ここでは、造形高さ H を3.0 mm、単位長さあたりの樹脂量 E を1.1 mmと設定し、ABS樹脂を用いて300 mm/minで造形を行った。

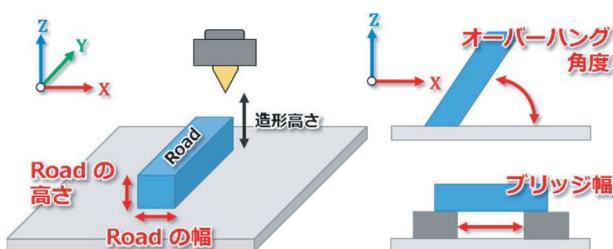


図6 デザインシステム実装のためのパラメータ。図に示すような形状のGcodeを作成して測定を行った

Fig. 6 Additional parameters required to implement a design system.

7.2 エンボス加工を施すためのデザインシステム

図4の分布を縦に見ると、同じ造形高さで樹脂量を制御可能であることが分かる。樹脂量が変化することで横方向への膨らみ方がわずかに変化するため、パラメータを組み合わせることで、エンボス加工のような表面が表現できる。図8は、このアイディアに基づいて実装されたデザインシステムである。このシステムは、2つのパラメータの組合せを使用することで、造形物の壁面に膨らみのある箇所を作り出すことができる。また、パラメータの切替えは、壁面に貼り付ける2値画像のテクスチャによって制御するという方法を採用した。現在の実装では、単純な壁面にこのテクスチャを貼り付けることにとどまっているが、より複雑な形状への応用、段階的な膨らみの表現などでより強力なデザインシステムとなることが期待される。

7.3 滑らかなシートのデザインのためのシステム

造形高さと樹脂量とを制御することで、造形される構造の太さを制御することが可能となる。これらを連続的に制御していくと、波打った平面を持ったシート[29]を造形することができる。このデザインシステムでは、最も太い部分・細い部分の2つのパラメータを連続的に補完した値を1つのRoadに埋め込み、互い違いになるように並べ

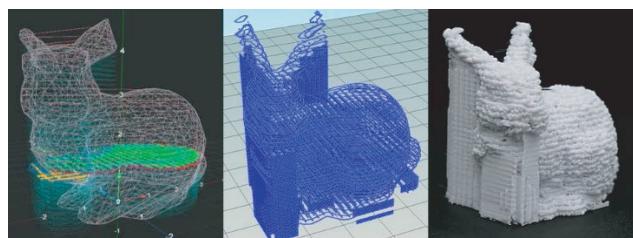


図7 Zigzag roadを利用するためのスライサ

Fig. 7 Slicer software with a zigzag road.

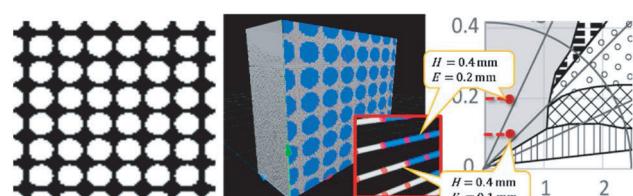


図8 表面にエンボス加工を施すデザインシステム

Fig. 8 Design system for emboss processing.

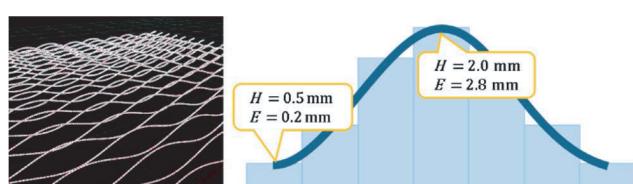


図9 滑らかなシートのデザインのためのシステムとパラメータを補完する内部処理の仕組み

Fig. 9 Design system for wavy sheets.

て造形する。具体的には、間のパスを細かな移動に分割し、各移動の際の高さと樹脂量を割り当てることで滑らかな表面の造形可能とする(図9)。Roadを並べるように造形するため、各パラメータでの横幅を事前に測定し、Roadどうしの間隔を調整する作業が必要となる。

8. 造形例

造形結果とデザインシステム、さまざまな樹脂を用いて、2Dと3Dの造形物を出力した例を図10に示す。なお、図6で示したように、各構造を維持したまま積層造形を達成するためには、Roadの高さ・横幅を明らかにする必要がある。そのため、使用するパラメータによって作られるRoadの高さ・横幅を事前に測定した。積層する場合は、第1層目の高さ位置を図4のグラフより選択し、2層目以降は測定したRoadの高さ分だけエクストルーダを上昇させながら造形する。XY平面に並べるように造形する場合は、測定したRoadの横幅分だけエクストルーダを移動させながら造形する。図10の上段は、このような造形パスを生成可能な簡易なプログラムを実装することで造形を行った。また、デザインシステムとして実装したスライサで処理した造形例を図11に示す。

Staircase effectの利用によって、太く安定したRoadで構成された造形例が作り出せる。このような段差が目立つ

表面は、高精度な造形のために回避しなければならない造形エラーの1つである。本論文では、太い構造を安定して造形できることを明らかにしたため、この現象を制御して、段差が目立つ外壁の表現方法として活用している。

Zigzag roadの積層によって作られた造形は、きわめてざらついた質感を持っている。全体の構造や積層状態は安定しており、鳥の巣のような見た目に仕上がる。なお、ABS樹脂と同じ設定をPLA樹脂やPolywood樹脂に用いると、部分的に螺旋構造になってしまうことが確認された。その場合、造形高さHと樹脂量Eを調整する必要があった。

Coil-like roadの積層によって作られた造形物には、Roadの構造によって一様な表面が作られている。この構造の積層は難しく、特に各層の造形開始・終了地点で、構造が歪んでしまったり、螺旋の回転方向が逆転したりする層が確認できる。この構造の積層には、エクストルーダの移動方法なども工夫する必要があるだろう。

エンボス加工は、太さ制御を用いた外壁のデザインである。デザインシステムを用いて、造形時の高さ位置が同じで樹脂量の異なる2組のパラメータを制御することで、外壁に模様や文字を浮き出させた。このような造形手法には先行例があるが[17]、本論文では、この構造を作り出すパラメータの組合せを定量的に示したといえる。樹脂の溢れ具合や造形可能性を詳細に調査したこと、より多様な表

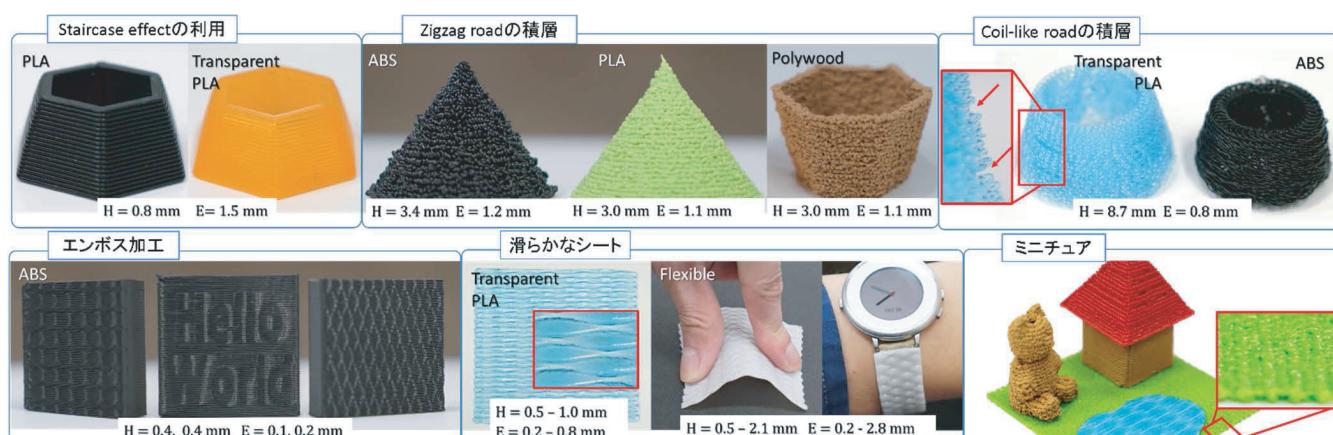


図10 提案手法を活用した造形例。それぞれの造形に使用した樹脂とパラメータを併記
Fig. 10 Example objects with new expressions. The materials and parameters used in each example are shown.



図11 デザインシステムのスライサを利用した造形例(3Dモデルの詳細は付録Aに記載)
Fig. 11 Example objects created by using the slicer software.

現が可能になるだろう。

触感のある滑らかな表面を持ったシートも、同様にデザインシステムを利用して作られている。フレキシブルフィラメントを使用すれば、柔らかいシートが造形でき、腕時計などの日用品に貼り付けて手触り感を変更することができる。太い部分を作る際に、単位長さあたりの樹脂量をきわめて多くした(約2.8mm)が、十分に速度を落とせば問題なく造形できることを確認した。このような太さ制御の手法は、造形部分によって精度を変更する Adaptive slicing [22]への応用も期待できる。また、著者らは、シート状の造形物を出力する手法 [29]を提案しているが、本論文の結果を用いても同様な造形を行うことができることを確認した。

これらの表現手法を組み合わせて、さまざまな3Dモデルのミニチュアとジオラマを作成した。本論文の手法によって、毛羽立った芝生や熊の毛並み、水面、家の壁面と屋根が表現されている。図11は、デザインシステムとして実装したスライサで、動物の3Dモデルを処理した例である(3Dモデルの詳細は付録Aに記載)。ここで利用されているZigzag roadは、樹脂量が標準的なパラメータよりも多い設定であり、造形された樹脂の上に積層されると、樹脂が垂れ落ちるような状態がしばしば発生した。スライサによって付加されたサポート構造はこのような現象を低減させるために活躍し、不安定な構造を安定して積層していくことを可能とする。また、一度安定したパラメータを設定することができれば、同じパラメータでさまざまな3Dモデルを処理することが可能である。

以上の例より、本論文で提案する手法がさまざまな立体形状に対して適用可能であり、熱溶解積層方式3Dプリンタを用いた質感表現のために有効であることが確認できる。

9. 議論

本論文では、パラメータ空間を探索するために、造形時の高さと樹脂量との関係式を拡張する方法を採用した。この方法を用いたことで、広範囲なパラメータ空間の効率的な調査、パラメータの組合せと造形結果との関係を示すことができた。得られた分布に従ってパラメータを選択すれば、各Roadの構造を意図的に制御できることが明らかになった。一方で、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、領域の境界には曖昧な箇所が存在する。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、これらが変化した場合でも、各構造に対応する分布が変化するのみで、パラメータ設定に関しては同様な考え方ができるだろう。実際に、造形例の出力時は、樹脂によってパラメータを調整

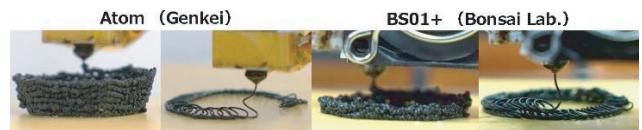


図12 他の3Dプリンタを利用した場合の造形の様子

Fig. 12 Application to other 3D printers.

し、ステッピングモータの脱調を推測して速度を落とす、という形で分布が活用された。

図12にはGenkei Atom^{*4}とBonsai Lab. BS01+^{*5}に提案手法を適用した様子を示した。これらの3Dプリンタは、ノズルに送られる樹脂がボーデンチューブと呼ばれるガイドを通るタイプであり、本論文で使用したNJB-200とは性能が異なる。このような場合でも造形速度を下げる程度の調整をすることで、図1に示した例と同様の造形パスをそのまま使用することができた。また、こういった異なる環境でより詳細な制御を実現したければ、本論文で示した調査を実施することでその環境特性を知ることができるだろう。

今後の課題として、各構造を正確に造形するための要件の整理があげられる。本研究の調査はすべて3Dプリンタのプラットフォーム上で行われており、調査結果は安定した平面上でどのような構造が得られるか、というものになっている。出力する立体形状や積層される土台の違いによっては、作られる構造が変化したり、サポート材が必要になったりする場合があるだろう。サポート材を付加する機能はデザインシステムに実装しているが、いくつかのRoadはサポート材の付加による形状変化や、取り外し困難なサポート材が付加されてしまう場合がある。また、造形される構造の太さとパラメータの関係を明らかにする必要がある。造形例のために部分的に計測を行ったが、パラメータ選択の自由度を高めるためには、造形後の形状をより正確に推定できることが望ましい。さらに、部分的に表現方法を変えたり、既存手法と組み合わせたりすることで、より豊かな表現を可能とすると考えている。

10. おわりに

本論文では、造形時のエクストルーダの高さ位置と樹脂量に注目し、熱溶解積層方式3Dプリンタの表現力を拡張する造形手法を提案した。樹脂量の設定式を、造形エラーを発生しうる範囲にまで拡張して、さまざまなパラメータの組合せに対して実験を行った。造形されたRoadを構造的特徴に応じて6つのカテゴリに分類し、それぞれを造形するためのパラメータの分布を示した。そして、実験結果を活用してさまざまな質感を持った造形例を示した。

多くの研究者やメーカーは、高解像度で高価な3Dプリンタを用いて高精度な造形を目指している。我々は、高精度

^{*4} <http://genkei.jp/atom2/>

^{*5} <http://www.bonsailab.asia/>

な造形とは、ユーザの表現したい形状を可能にすることであり、一方的に解像度を高めることではないと考えている。本研究では、造形エラーまでも表現手法の1つになりうるととらえ、造形物のテクスチャや表面の状態、見た目などを表現するための基礎的な考え方を提供した。

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] Agarwala, K.M., Jamalabad, R.V., Langrana, A.N., Safari, A., Whalen, J.P. and Danforth, C.S.: Structural quality of parts processed by fused deposition, *Rapid Prototyping Journal*, Vol.2, No.4, pp.4–19 (1996).
- [2] 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).
- [3] Anitha, R., Arunachalam, S. and Radhakrishnan, P.: Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.118, No.1-3, pp.385–388 (2001).
- [4] Bellini, A.: Fused deposition of ceramics: A comprehensive experimental, analytical and computational study of material behavior, fabrication process and equipment design, Ph.D. dissertation, Drexel University, Philadelphia, PA, 2002.
- [5] Blit it, available from <<https://blitit.com/>> (accessed 2017-11-15).
- [6] Brun, P.-T., Audoly, B., Ribe, N.M., Eaves, T.S. and Lister, J.R.: Liquid ropes: A geometrical model for thin viscous jet instabilities, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.114, No.17 (2015).
- [7] Carbon3D, available from <<http://carbon3d.com/>> (accessed 2017-11-15).
- [8] Crockett, S.R. and Calvert, D.P.: The liquid-to-solid transition in stereodeposition techniques, *Proc. Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp.257–264 (1996).
- [9] Dolenc, A. and Mäkelä, I.: Slicing procedures for layered manufacturing techniques, *Computer-Aided Design*, Vol.26, No.2, pp.119–126 (1994).
- [10] Epic 3D printing fail, available from <<http://epic3dprintingfail.tumblr.com/>> (accessed 2017-11-15).
- [11] Galantucci, L.M., Bodí, I., Kacani, J. and Lavechia, F.: Analysis of dimensional performance for a 3D open-source printer based on fused deposition modeling technique, *Procedia CIRP*, Vol.28, pp.82–87 (2015).
- [12] Gannon, M., Grossman, T. and Fitzmaurice, G.: Tactum: A skin-centric approach to digital design and fabrication, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*, pp.1779–1788 (2015).
- [13] Han, W., Jafari, A.M., Danforth, C.S. and Safari, A.: Tool path-based deposition planning in fused deposition processes, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.124, No.2, pp.237–246 (2002).
- [14] Olivier van Herpt. Solid Vibrations. available from <<http://oliviervanherpt.com/solid-vibrations/>> (accessed 2017-11-15).
- [15] Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C. and Bowyer, A.: RepRap – The replicating rapid prototype, *Robotica*, Vol.29, No.1, pp.177–191 (2011).
- [16] 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*, Vol.2, No.3, pp.92–105 (2015).
- [17] 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).
- [18] Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G. and Martorelli, M.: The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer, *Rapid Prototyping Journal*, Vol.21, No.5, pp.604–617 (2015).
- [19] Laput, G., Chen, A.X. and Harrison, C.: 3D printed hair: fused deposition modeling of soft strands, fibers and bristles, *Proc. ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '15)*, pp.593–597 (2015).
- [20] Mueller, S., Im, S., Gurevich, S., Teibrich, A., Pfisterer, L., Guimbretière, F. and Baudisch, P.: WirePrint: 3D printed previews for fast prototyping, *Proc. ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '14)*, pp.273–280 (2014).
- [21] Ou, J., Dublon, G., Cheng, C.-Y., Heibeck, F., Willis, K. and Ishii, H.: Cilllia: 3D printed micro-pillar structures for surface texture, actuation and sensing, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16)*, pp.5753–5764 (2016).
- [22] Pulak, P.M., Reddy, N.V. and Dhande, G.S.: Slicing procedures in layered manufacturing: A review, *Rapid Prototyping Journal*, Vol.9, No.5, pp.274–288 (2003).
- [23] Reiner, T., Carr, N., Měch, R., Št'ava, O., Dachsbacher, C. and Müller, G.: Dual-color mixing for fused deposition modeling printers, *Computer Graphics Forum*, Vol.33, No.2, pp.479–486 (2014).
- [24] Roumen, T., Kruck, B., Dürschmid, T., Nack, T. and Baudisch, P.: Mobile fabrication, *Proc. ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '16)*, pp.3–14 (2016).
- [25] Schüller, C., Panizzo, D. and Sorkine-Hornung, O.: Appearance-mimicking surfaces, *ACM Trans. Graphics*, Vol.33, No.6, Article 216 (2014).
- [26] Schumacher, C., Bickel, B., Rys, J., Marschner, S., Daraio, C. and Gross, M.: Microstructures to control elasticity in 3D printing, *ACM Trans. Graphics*, Vol.34, No.4, Article 136 (2015).
- [27] Simplify3D: Print Quality Troubleshooting Guide, available from <<https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>> (accessed 2017-11-15).
- [28] Sun, Q., Rizvi, G.M., Bellehumeur, C.T. and Gu, P.: Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments, *Rapid Prototyping Journal*, Vol.14, No.2, pp.72–80 (2008).
- [29] Takahashi, H. and Miyashita, H.: Thickness control technique for printing tactile sheets with fused deposition modeling, *Adjunct Proc. ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '16)*, pp.51–53 (2016).
- [30] 高橋治輝, 宮下芳明：造形高さと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, 第24回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショッピング論文集 (WISS2016), pp.193–198 (2016).
- [31] Takahashi, H. and Miyashita, H.: Expressive fused deposition modeling by controlling extruder height and extrusion amount, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17)*, pp.5065–5074

- (2017).
- [32] Torres, C., Campbell, T., Kumar, N. and Paulos, E.: HapticPrint: Designing feel aesthetics for digital fabrication, *Proc. ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '15)*, pp.583–591 (2015).
- [33] Turner, N.B., Strong, R. and Gold, A.S.: A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling, *Rapid Prototyping Journal*, Vol.20, No.3, pp.192–204 (2014).
- [34] Turner, N.B. and Gold, A.S.: 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).
- [35] Venkataraman, N., Rangarajan, S., Matthewson, M.J., Harper, B., Safari, A., Danforth, C.S., Wu, G., Langrana, N., Guceri, S. and Yardimci, A.: Feedstock material property – process relationships in fused deposition of ceramics (FDC), *Rapid Prototyping Journal*, Vol.6, No.4, pp.244–252 (2000).
- [36] Wang, T.-M., Xi, J.-T. and Jin, Y.: A model research for prototype warp deformation in the FDM process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.33, No.11, pp.1087–1096 (2007).

付 錄

付録 A 図 11 の 3D モデルの入手元

- Low poly fox (by Slavikk)
<http://www.thingiverse.com/thing:937740>
- Low poly giraffe (by Slavikk)
<http://www.thingiverse.com/thing:908561>
- Low poly cat (by Slavikk)
<http://www.thingiverse.com/thing:908621>
- Low poly labrador (by 3DWP)
<http://www.thingiverse.com/thing:446787>
- Low poly owl statue (by saf)
<http://www.thingiverse.com/thing:465309>

(URL は 2017 年 11 月 15 日確認)



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. ヒューマンインターフェース学会, 日本ソフトウェア科学会, ACM 各会員.



高橋 治輝 (学生会員)

明治大学理工学部情報科学科卒業. 同大学大学院理工学研究科新領域創造専攻ディジタルコンテンツ系博士前期課程修了. 2015 年度より同大学院博士後期課程に在籍するとともに総合数理学部助手. 2017 年度より, 同大学院先端数理科学研究科に転入, 現在に至る.