

熱溶解積層方式 3D プリンタのブリッジ造形における 太さ制御を用いた濃淡とモアレ表現

高橋治輝¹⁾(正会員)

1) 立命館大学情報理工学部

Gray-scale and Moiré using Thickness Control in Bridge Structure of Fused Deposition Modeling 3D Printers

Haruki Takahashi¹⁾

1) College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

haruki@fc.ritsumei.ac.jp

概要

熱溶解積層方式 3D プリンタを用いて造形可能な形状のひとつとして、空中に橋渡しされた細い構造「ブリッジ」があり、毛の造形やサポート構造の造形などに応用されている。本研究では、ブリッジの造形を発展させて芸術表現に活用することを目指し、橋渡しされた 1 本のブリッジの太さに注目した。これまでのブリッジは始点から終点まで一様な太さで造形されていたが、樹脂押出量と造形速度の制御を駆使することで、ブリッジの太さを直径 0.5–0.2 mm 程度の範囲で、橋渡しされた途中の部位であっても変化させられることがわかった。この太さを変化させたブリッジを 1.0 mm 程度の間隔で密集させれば、ハッチングのような濃淡表現が可能となる。また、造形方向を変化させながら複数層のブリッジを造形することで、モアレも発生させることができる。本論文では、ブリッジの太さ制御の実現可能性を検証するとともに、太さの制御に寄与するパラメータの探索を行い、材料や 3D プリンタが変化した際のキャリブレーションと造形の安定化について述べる。これらの知見をもとに実装したシステムを用いて造形例を制作し、本手法の課題や今後の展望について議論する。

Abstract

Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printers can print a structure called a "bridge," which is a thin structure formed in mid-air with both ends fixed. In this study, we focus on the thickness of each bridge to further develop this structure for artistic printing. In conventional 3D printing, bridges have a uniform thickness from beginning to end. By controlling the amount of material and the printing speed, it is possible to change the thickness of the bridge within a range of about 0.5–0.2 mm in diameter. We can also create a gray-scale representation similar to hatching by densely printing the bridges with controlled thickness at intervals of approximately 1.0 mm. It is also confirmed that moiré patterns can be created by printing multiple bridge layers while changing the angle of the printing direction. This paper examines the feasibility of controlling bridge thickness, explores the parameters that contribute to our technique, discusses calibration when materials or 3D printers change, and describes efforts to achieve stable printing. We also present a design system and examples, and discuss future work of our technique.

1 はじめに

1.1 背景

3D プリンタの普及に伴って、高精度な立体形状を誰もが手軽に制作できるようになり、こうした工作機械を用いて作品を制作するデザイナーやアーティストも活躍している。Thingiverse^{*1}などのサイトでは、3D プリンタのユーザによって数多くの 3D モデルが共有されており、誰でもダウンロードして造形することができる。3D プリンタを用いた作品制作の事例としては、積彩^{*2}の色調表現、新工芸舎^{*3}の「編み重ね」、Honoka^{*4}の「い草」を材料とした造形などがある。3D モデリングソフトで作成した 3D モデルを出力する基本機能の進歩だけでなく、3D プリンタならではの表現や制御を駆使した作品も登場しており、従来の工芸や製造との対比も以前にも増して活発に行われている。

熱溶解積層（材料押出）方式 3D プリンタは、3D プリンタの発展の立役者的存在であり、さまざまな造形や作品制作に活用されている。溶かしたプラスチックをノズルから押し出して積層するという単純な仕組みに加えて、この方式の 3D プリンタには、安価で手軽であること、多様な材料が利用できること、制御プログラム（Gcode）の工夫による制御が行えることといった強みがある。著者はこれまで、熱溶解積層方式 3D プリンタの制御を駆使したものづくりの方法を「造形手法」と呼び、質感表現 [1] や毛の造形 [2] についての研究に従事し、作品として「たんぽぽの綿毛 [3]」の制作にも取り組んだ。

1.2 ブリッジ構造の造形と太さの制御

本研究で注目するのは、熱溶解積層方式 3D プリンタを用いて造形可能な形状のひとつ「ブリッジ」である。この方式の 3D プリンタは、空中（材料を押し出すノズルの直下に積層される対象がない）場合であっても造形が可能であり、紐状に押し出された材料の始点がどこかに固定されていれば、そのまま空中で樹脂を引き伸ばすことができる。さらに、その終点が別の場所に固定されれば、空中に橋渡しされた紐状の細い構造が出来上がる。ブリッジは熱溶解積層方式で造形可能な特徴的な構造で

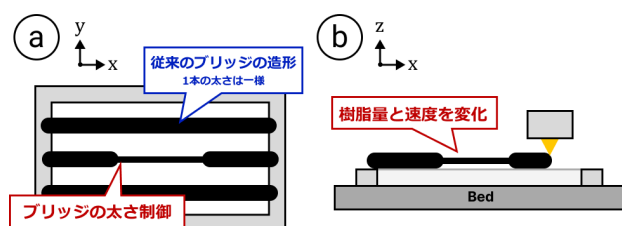


図1 ブリッジの造形と太さ制御. ブリッジの太さ制御 (a) を、樹脂量と速度の制御で実現する (b).

あり、これを String art に応用して作品を制作しているデザイナー [4] がいる。また、空中での造形によって材料の量を削減できるため、ブリッジを用いたサポート構造 [5] も提案された。さらに、ブリッジで複数の 3D モデルを連結することで、その部分に柔軟性を持たせて変形可能な造形物を作成する手法もある [6]。

ブリッジがさまざまな造形に応用されている一方で、1本のブリッジの太さに着目してみると、固定された始点から空中に浮いた中央付近、そして別の場所に固定される終点に至るまで一様な太さで出力される（図 1a）。この1本のブリッジの太さを途中で変更するというアイデアはこれまでに探究されてこなかった。その理由として、ブリッジ自体の不安定さがあげられるだろう。空中に作られる構造はそれだけで不安定であり、太さの制御を行った際に造形が可能であるか、どの程度の長さや密度まで造形が可能かなどの調査は行われていない。また、ブリッジの太さ制御がどういった用途で活用できるかという応用先の乏しさも理由のひとつに考えられる。

1.3 本研究の取り組み

本研究では、ブリッジ造形中の樹脂量と速度の制御によって太さ制御を実現し、これを芸術表現に活用することを目指す（図 1b）。ブリッジの太さを部分的に変更することで、細く造形された箇所は太い箇所よりも背景が目立つようになる。つまり、太さを制御を行ったブリッジを密集させれば、絵画におけるハッチングのような濃淡表現が可能となる。また、造形方向を変化させながら複数層のブリッジを造形することで、モアレの発生が確認できた。本論文では、ブリッジの太さ制御の実現可能性を検証するとともに、太さ制御に寄与するパラメータを調査する。具体的には樹脂量と造形速度のふたつであり、これらを試行錯誤的に探索することで、どのように変化を加えれば部分的な太さ制御が可能となるかを調べる。また、性能評価としてブリッジ同士の間隔や太さ制

^{*1} <https://www.thingiverse.com/>

^{*2} <https://sekisai.com/>

^{*3} <https://www.shinkogeisha.com/>

^{*4} <https://honoka-lab.jp/>

御で表現できる濃淡の間隔についても調査し、材料や3Dプリンタが変化した際のキャリブレーション方法についてもまとめる。調査から得られた知見をもとにシステムを実装し、これを用いて3Dプリントした作例を紹介するとともに、手法の課題や今後の展望を議論する。

2 ブリッジの造形における太さ制御

本手法を活用できる環境は、Gcodeを用いた造形が可能な熱溶解積層方式3Dプリンタと溶解した際に糸を引くような材料である。本稿では、造形手法とパラメータ探索手法の構築のためにCreality社^{*5}の3DプリンタEnder-2 Pro^{*6}を使用した。材料はPolymaker社^{*7}のPolyMax PLA Blackを使用した。ノズルの温度は200°C、ヒートベッドの温度は40°Cで造形を行う。

なお、本論文に掲載されている写真は、ブリッジ部分のはっきりと見えるような背景色を意図的に選んで撮影されている。撮影時は影が過剰に写り込まないように照明を調整しており、図中の注目箇所がわかる程度に輝度補正を行っている。また、液晶ディスプレイで表示する場合は意図しないモアレが発生することがあるため、十分な解像度および拡大率で確認されたい。

2.1 3Dプリンタのパラメータ探索の難しさ

熱溶解積層方式3Dプリンタでの造形にはさまざまなパラメータが影響しており、それらすべてを探索して最適値を求めることは困難である。また、最適なパラメータを見つけられたとしても3Dプリンタや材料が変化したり、造形環境（温度や室温など）が変化したりするとその値が使用できなくなることもある。特に、本研究で注目するブリッジは空中に作られる構造であるため、樹脂を押し出すときのノズルの状態や材料の種類などが顕著に影響すると考えられる。

そこで、太さ制御において支配的となるパラメータとして「樹脂量」と「造形速度」にのみ着目し、これらを段階的に変化させて出力することで手法に相応しいパラメータを選定する方法をとる。また、パラメータの探索にはフレームとその間に橋渡しされるブリッジで構成さ

表1 ブリッジ部分を造形するGcodeの例

```

...
; これ以前はフレームの造形
; 樹脂の引き戻しを行いブリッジの始点へ移動
G1 F800 E-3
G1 F300 Z3.6
G0 F9000 X18.45 Y26.83
G1 F300 Z1.6
; ブリッジの造形開始は緩やかに加速
G1 F800 E3
G4 P1000
G1 F30 X18.95 Y26.83 Z1.65 E0.033
G1 F60 X19.45 Y26.83 Z1.71 E0.033
...
; ブリッジの造形（太い箇所）
G1 F300 X25.42 Y26.83 Z2.23 E0.033
G1 F300 X25.92 Y26.83 Z2.26 E0.033
...
; ブリッジの造形（細い箇所）
G1 F900 X29.87 Y26.83 Z2.49 E0.011
G1 F900 X30.37 Y26.83 Z2.52 E0.011
...
; ブリッジの終点
G1 F800 E0.1
; 次のブリッジへ
...

```

れた造形物を使用する（図2参照）。ブリッジの長さは80 mm、間隔は1.4 mmで造形しており、フレーム部分に両端を固定することで5 mmだけ空中に浮かせる。また、ブリッジは中央付近を1.2 mm程度だけ持ち上げたアーチ形状の曲線から生成している。これは、すでに造形された部分と造形中のブリッジとの間隔を少しでも広げるための工夫であり、両端が固定されることでアーチ形状による影響は見られなくなる。パラメータの制御はすべて3Dプリンタの制御プログラムであるGcodeを介して行えるものとなっており、Gcode内のパラメータを変更することでさまざまな調査を行う。

2.2 ブリッジ造形のGcode

本手法で生成されるGcodeの例として、表1にフレーム部分の造形直後からブリッジ部分の造形開始、造形中の太さ制御、ブリッジの終点までの流れを示す。Gcodeは工作機械を駆動するための命令を順番に並べたもので、各命令に対応したパラメータがスペース区切りで並べられている。表1で使用されている命令は、G0およびG1（移動命令）とG4（一時停止）である。移動命令であるG1は、移動先の位置座標としてX, Y, Z, 樹脂

^{*5} <https://www.creality.com/>

^{*6} Ender-2 Proは安価で小型であることが特徴だが、2023年5月時点で製造が中止されている。しかし、一般的な熱溶解積層方式と遜色のないハードウェアで構成されており、本手法のために用いる3Dプリンタとして問題はないと判断した。

^{*7} <https://www.poly-maker.jp/>

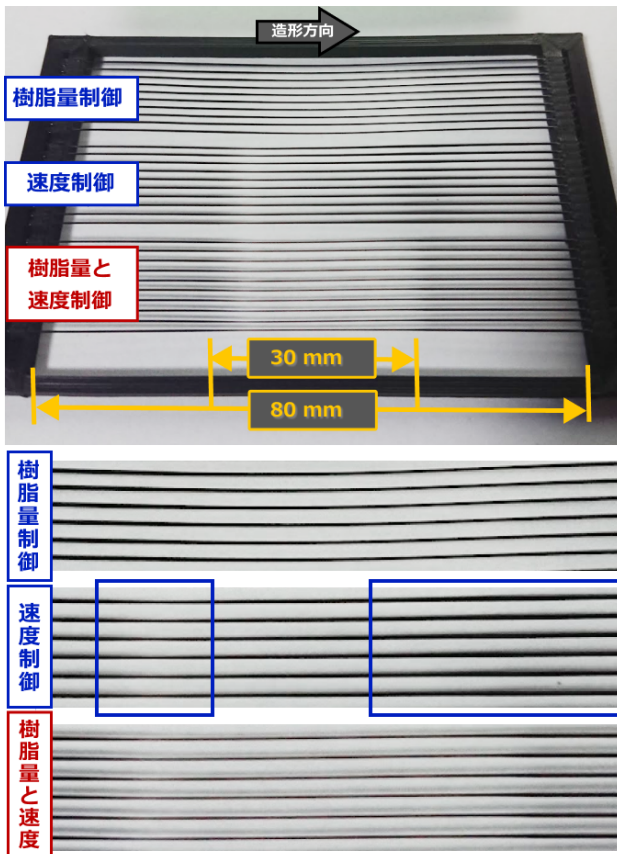


図2 樹脂量と速度を組み合わせた太さ制御の仕組みと拡大図。ブリッジの太さは樹脂量の制御だけでは十分な変化が得られない。また、速度の制御だけでは瞬間的な太さの変化や速度制御後の部分が太くなる現象が確認された（図中の青枠）。

の押し出し量として E をパラメータに持つ（単位はいずれも [mm]）。 F は造形速度であり、単位は [mm/min] である。 E が負の場合、樹脂を逆方向に引き戻すことを意味しており、これはノズルから樹脂が溢れることを防止するリトラクションと呼ばれる動作となる。一時停止の G4 は、停止時間を P （単位は [ms]）に設定して使用する。本手法は、こうした Gcode の命令のパラメータ部分の数値を調整していくことで実現されている。

2.3 太さ制御の方法

造形中に太さを制御するためには、移動中のノズルから押し出される樹脂量を減らせば良く、これを実現する方法として「樹脂量」と「造形速度」の調整がある。いずれも前述の移動命令 G1 にパラメータとして含まれている。これらを調整した際に出力される造形物の例と太さ制御を行った部分の拡大図を図2に示す。

樹脂量の制御は、細く造形したい箇所の移動命令に含まれている E の値を小さくすることで樹脂量を減らす方法であり、造形されるブリッジは値の減少に応じて細くなる。原理的に理解しやすく、先行研究（たとえば、[7, 8]）でも用いられた方法である。しかし、この方法は太さの変化の即時性に課題がある。ノズル内には常に溶けた樹脂が蓄えられた状態で一定の量だけ押し出されるようになっており、Gcode 上で樹脂量を変化させても実際の造形に即座に反映されない。この様子は、図2の上段に示した部分で確認できる。この例では、長さ 80 mm のブリッジの中央 30 mm 部分で樹脂量を $1/3$ に変化させた。この箇所はそれ以外の箇所に比べてたしかに細くなっているものの、太さの変化は緩やかで、特に太さの切り替わり部分が不明瞭である。

造形速度の制御は、移動命令にある F の値を大きくすることで樹脂が押し出される前にノズルを動かしてしまう方法であり、造形されるブリッジは樹脂の押し出しが間に合わないため細くなる。この方法は、Velocity painting [9] で用いられており、造形物の表面に鮮やかな模様を描くことを可能としている。しかし、造形中の樹脂量は造形速度の変化に影響されないため、ノズルの移動速度の上昇に伴って樹脂の押出速度も上昇する。これによって、加速時に押し出しが間に合わなかった分の材料が遅れて押し出される現象が生じる。図2の中段は中央 30 mm 部分で造形速度を3倍にしたものである。速度を上昇させることで瞬間的に細く造形できるものの、すぐに元の太さに戻り、太さ制御の終端付近ではむしろ太く造形されてしまう（図2の青枠）。また、加速具合によっては後から勢いよく押し出された樹脂で不自然に変形するという問題も生じ、これによりブリッジの造形自体が失敗する可能性もある。

そこで、本手法では樹脂量と造形速度の制御を組み合わせ、速度の上昇に合わせて樹脂量を減らすことで細い箇所の造形を実現する。これらを適切な倍率で調整することによって、ノズルの移動速度に関わらず、樹脂を一定速度で押し出すことができるようになる。図2の下段はこの組み合わせを用いて太さを制御した例であり、太さの変更を加えた位置や細く連続した部分が明確に造形できるようになっている。

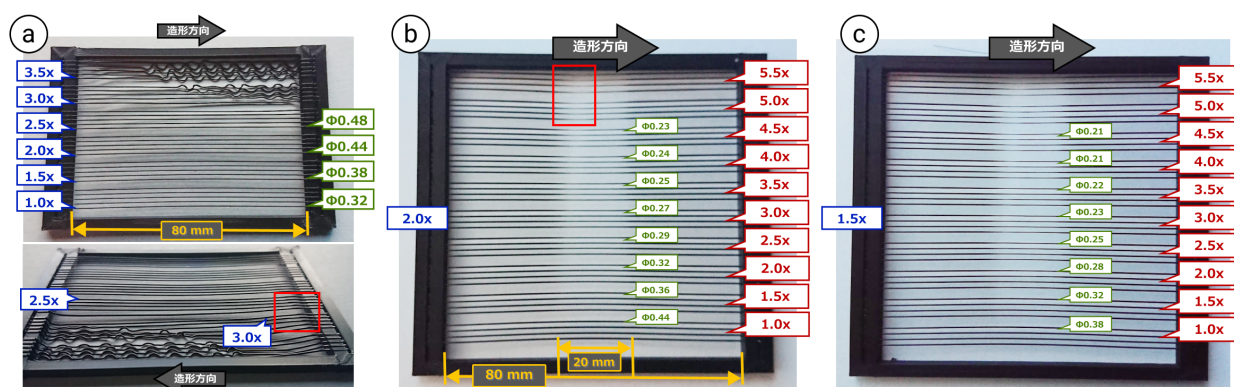


図3 樹脂量の基準値および太さ制御のための倍率の探索. 樹脂量 E に対して適当な値 (各図中の左側の青字) を乗じていき, 安定した造形が行えるか調査した (a). この結果から 2.0 倍と 1.5 倍の樹脂量を基準値と採用し, ここに対して適当な倍率 (右側の赤字) だけ速度を上昇させて樹脂量を減少させる造形テストを行った (b, c).

3 太さ制御のためのパラメータ探索

本手法を構築する上で設定が必要になるパラメータは, 通常部分 (太い部分) のブリッジ造形に用いる樹脂量と造形速度の基準値, そして太さ制御 (細い部分の造形) のために用いる調整用の値である. ここでは, それぞれのパラメータ探索のために造形した出力物と調査結果について述べる. また, ブリッジ造形の太さ制御の性能評価として, ブリッジ同士の間隔と太さ制御の間隔についても造形テストを行った.

なお, 樹脂量計算には, ノズルから 3D プリンタのベッド上へ押し出されたプラスチックを直方体に近似した形状と, 押し出す前のフィラメントの体積が等しくなるという前提から導出される以下の式を用いた. 直方体の体積は LayerHeight (層の高さ), NozzleWidth (ノズルの幅), Length (押し出された造形物の長さ) の 3 辺から計算され, これとフィラメントの断面積と E (押し出す長さ) で求められる円柱の体積とが等しいものとして導出される (先行研究 [1] も参考にされたい).

樹脂量の計算

$$E[mm] = \frac{\text{LayerHeight} \times \text{NozzleWidth} \times \text{Length}}{\text{Cross sectional area of filament}}$$

3.1 樹脂量と造形速度の基準値

パラメータ探索の最初のステップとして, ブリッジの太い部分を安定して造形するための樹脂量と造形速度の基準値を決定する. 前述のように, この基準となるブリッジに太さ制御を加える (樹脂量を減らして速度を増やす) ことを想定しているため, 造形は可能な限り遅く, 樹脂量は可能な限り多く造形するほうが望ましい.

まず, 一般的に用いられている造形速度や試行錯誤のための造形時間などを検討しながら, 造形速度の基準値を実験的に 300 mm/min と設定した. スライサソフトウェアの Cura^{*8}のプロファイルを参照してみると, 一般的な速度は 3000–3600 mm/min 程度 (フレーム部分はこの速度で造形する), 1 層目や外周などの精度を求めるような部分でこれの半分程度の速度が用いられている. 従って, この基準値は造形速度としては十分に遅く, またブリッジの造形も安定して行える値である. さらに, ここから速度を上昇させられるだけの余裕もあり, たとえば 5 倍 (1500 mm/min) にしてもブリッジは問題なく造形できる. また, 図 3 や図 4 で示す造形例でこの造形速度を用いたところ, いずれも 30–40 分程度と現実的な造形時間で造形を完了できた.

樹脂量の基準値は E の導出の式に適当な数値を乗じていながら実際にブリッジを造形し, 樹脂量をどこまで増やすことができるかを調査して決定した. この造形テストの様子を図 3a に示す. このときの造形速度は 300 mm/min で固定している. 樹脂量 E の値を 1.0 倍から 0.5 倍刻みで増やし続けたところ, 2.5 倍を越えたあたりでブリッジに撓みが見え始め, 3.0 倍になると 3D プリンタのベッドに垂れ落ちた. これらのブリッジの中央付近の太さをノギスで計測したところ, 標準の設定である 1.0 倍で直径 0.32 mm, 2.0 倍で直径 0.44 mm, 2.5 倍で直径 0.48 mm まで太く造形された. 以上より, 樹脂量を 1.0–2.0 倍程度に増やした値を基準値として, ブリッジの太い部分を造形することとする.

^{*8} <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>

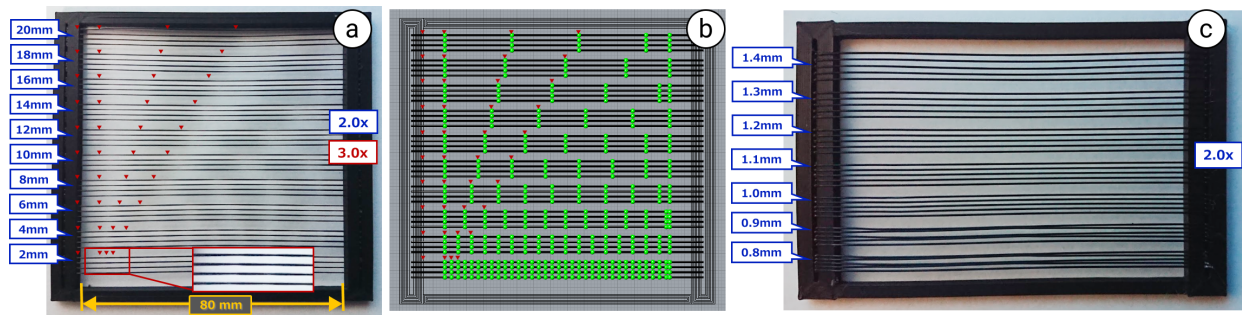


図4 太さ制御を適用したブリッジ造形の性能. 太さ制御を繰り返し行った際の濃淡表現の間隔 (a) とその制御位置のプレビュー (b) を見ると 4 mm 程度の間隔で行われた太さ制御も確認できる. ブリッジ同士の間隔 (c) では, 1.0 mm 程度の密度までブリッジを密集できることがわかる. いずれも基準の樹脂量を 2.0 倍とし, 太さ制御に用いる倍率を 3.0 倍とした.

3.2 太さ制御に用いる倍率

次に, 太さ制御の際に樹脂量と造形速度を調整するための値を探索する. この値を倍率として用いて, たとえば速度を 3 倍にしたら樹脂量を 1/3 倍にする, といった具合に調整を行う. この調整によって, 移動速度を上昇させた分だけ樹脂の押出量が減少し, 結果として樹脂の押出速度が一定に保たれる. この倍率を決定する調査でも, 基準値の探索と同じように, Gcode の樹脂量 E および造形速度 F に適当な数値を乗じて造形された結果を観察する方法を用いた.

倍率を変化させながら造形した様子を図 3b, c にそれぞれ示す. 太さ制御は 80 mm のブリッジの中央 20 mm の部分で行っており, 図 3b では樹脂量の基準値を 2.0 倍, 図 3c では 1.5 倍に設定している (図中の青字). 図中の赤字で示した倍率が速度に乘じた値であり, 同時に樹脂量にこの値の逆数を乗じている. 太さ制御によって細く造形された部分の中央付近をノギスで計測した結果も図中に示した.

いずれの結果においても倍率の変化に応じて, 太さ制御を行った部分が細くなっている様子が確認できる. また, 樹脂量の基準値を 1.0 倍のまま造形した結果 (図 3a, 直径 0.32 mm) と基準値を 2.0 倍にした後に太さ制御で 1/2 倍にした部分 (図 3b, 直径 0.32 mm) の太さが等しいことなどから, 同じパラメータになる組み合わせで一貫した太さが得られていることがわかる. 造形速度を 5.0 倍程度まで加速させてもブリッジが途中で途切れることはなかったが, 図 3b 中の赤枠で示したように, ノズルが加速しはじめる箇所がかなり細くなってしまっている. こうした部位は, 造形部の周囲を移動するノズル

の熱やファンの風の影響を受けやすく, ブリッジ造形の失敗を招く可能性がある. 造形の安定性と太さの変化の具合を考えると, 2.0–3.0 倍程度の倍率を用いて樹脂量と造形速度を調整することが望ましい.

3.3 太さ制御の間隔

太さ制御を行った際に, どの程度の距離間隔で太さの切り替えが可能かを知るための性能調査を行った. この調査のために, 2, 4, ..., 20 mm と間隔を変えながら繰り返し太さ制御を行う構造を準備した (図 4b, 赤印が太さ制御の位置). 太さ制御の具合によって結果が異なることが考えられるが, ここでは樹脂量の基準値を 2.0 倍とし, 太さ制御に用いる倍率を 3.0 倍として造形を行った.

太さ制御の距離間隔を変化させながら造形した結果を図 4a に示す. これまでの造形でも用いた 20 mm 間隔では問題なく濃淡が見えており, これを 4 mm 程度まで細かくしても太さ制御による濃淡の変化が観察できる. 2 mm 間隔になると目視で確認することが難しいが, 拡大してみるとブリッジの中で細い部分が作られていることが確認できた.

3.4 ブリッジの間隔

最後に, ブリッジ同士の間隔をどの程度まで狭めて密に造形できるかを調査した. この造形テストの結果を図 4c に示す. なお, 樹脂量の基準値を 2.0 倍として造形しており, 太さの制御は行っていない. こまでの造形テストで用いた 1.4 mm 間隔から 0.1 mm ずつ狭めていったところ, 0.9 mm 間隔になったあたりでブリッジ同士の接触や変形が生じることがわかった. これはすでに造形された部分の近くを高熱のノズルが通ったり, すぐ隣に高温の状態の樹脂が橋渡しされたりするためである.

ここでは一様な太さのブリッジを用いたが、実際には細く造形された部分のほうが熱の影響を受けやすいことが考えられる。造形の安定性を考慮すると 1.2 mm 程度の間隔を開けてブリッジを並べると良いだろう。

3.5 パラメータのまとめとキャリブレーション方法

以上の調査によって求められたパラメータは以下の通りである。

- 造形速度の基準値：300 mm/min
- 押出量 E に乗ずる基準値：1.0–2.0
- 押出量 E と速度 F を調整する値：2.0–3.0
- 太さ制御の間隔：最短 4 mm，最長 20 mm
- ブリッジ同士の間隔：1.2 mm 程度

次章で述べるシステムは、これらの値をパラメータとして受け取って Gcode を生成するように設計する。なお、各パラメータの範囲は安定した造形と太さ制御を行うために必要な条件であり、この範囲外の値を禁ずるものではない。たとえば、敢えて過剰な値を与えることで 3D プリントとして面白い効果が得られるかもしれない。

なお、3D プリンタや材料などの造形条件が異なる場合であっても、造形速度の基準値や押出量 E の計算式はそのまま適用することができる。また、造形条件の変更によって太さ制御が正しく行えない場合は、ここまでに使用した調査用の Gcode 用いて倍率を変えながら最適なパラメータを探索すると良い。手軽に済ませるのであれば、まず、図 3a で示したオブジェクトを用いて押出量 E に乗ずる基準値を定め、ブリッジの造形可能性を見定める。そして、適当な基準値を選出して図 3b で示したオブジェクトを用いて太さ制御の倍率を探れば良い。5 章では、異なる 3D プリンタ（Creality CR-10 V3, JGMaker Artist-D Pro）と材料を用いてもブリッジの太さ制御が行えることを実際の出力例を提示しながら紹介する。

4 システム

システムの実装には、RhinoCeros^{*9}および Grasshopper^{*10}を使用した。Grasshopper は CAD ソフトウェアである RhinoCeros に内蔵されたビジュアルプログラミング言語であり、さまざまなコンポーネントを組み合わせ

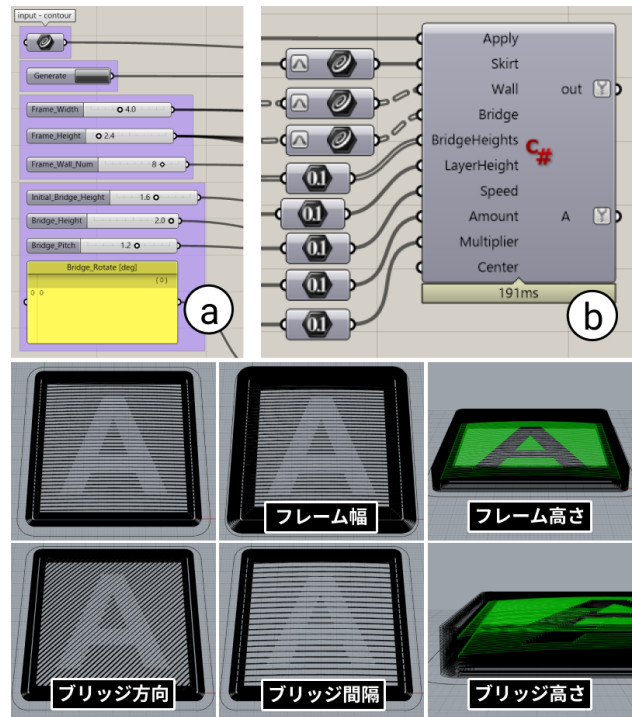


図 5 システムを構成する Grasshopper スクリプト。スクリプト内にはパラメータを入力するための UI (a) やジオメトリ生成のためのコンポーネント、Gcode を生成する C#コンポーネントがある (b)。パラメータの組み合わせでさまざまなフレームやブリッジが造形できる。

せることでジオメトリを生成したり、パラメトリックな 3D モデリングを行ったりすることが可能である。

Grasshopper のスクリプトとして実装された本システムは大きく分けてふたつの部分から構成されており、ひとつは入力されたジオメトリとパラメータから Gcode を生成する C#コンポーネント部分、もうひとつはこのコンポーネントに入力されるジオメトリ生成用コンポーネントとパラメータ入力用の UI を並べた部分である。前章のパラメータ探索のためにも同じシステムを用いており、入力されるパラメータやジオメトリを作り変えることで異なる Gcode 生成を実現している。

4.1 UI とブリッジのジオメトリ作成

パラメータをシステムへ入力させるための UI として、Grasshopper スクリプトに用意されているボタン、スライダ、パネルなどの UI コンポーネントを使用した。図 5a はその一部を示したものである。スクリプト上に配置された UI を操作することで、別のコンポーネントで使

^{*9} <https://www.rhino3d.co.jp/>

^{*10} <https://www.grasshopper3d.com/>

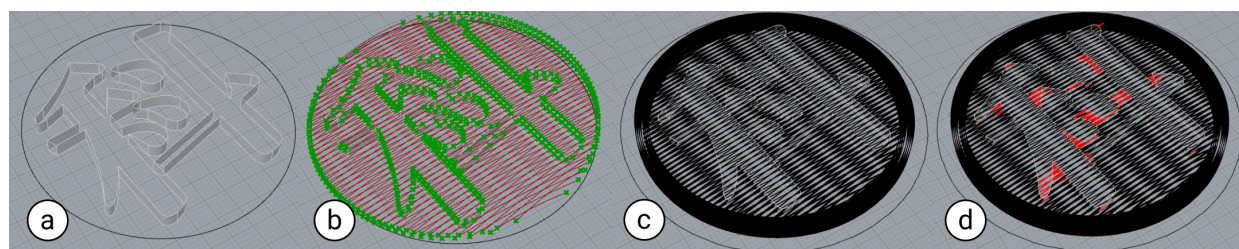


図6 システムを用いたブリッジの生成. システムにはフレームの輪郭となる曲線と太さ制御を行う部分を指定するための曲線（ここではテキストの輪郭から生成された曲線）を入力する (a). 次に、フレーム内を埋め尽くすようにブリッジに相当する曲線を生成する. この曲線をテキストの輪郭との交点で分割して太さ制御のためのパラメータを割り当てる (b). システムは簡易的なプレビューを提供しており (c), もし極端に長い, 短い間隔で太さ制御を施されたブリッジが含まれていた場合は赤く強調表示する機能も実装した (d).

には, 前述した太さ制御のためのパラメータに加えて, フレームの幅・高さ・位置, ブリッジの初期層位置・間隔・造形方向, 3D プリンタ関連のパラメータ (ノズル口径, 積層ピッチなど) も入力することができる. 図5の下部に, これらパラメータを変更した際の例を示す.

まず, システムは入力されたパラメータをもとにフレームのジオメトリを生成する. フレームの立体形状は, ベースとなる曲線を指定された幅だけオフセットして面にし, 高さ方向へ押し出すことで生成する. このフレームの立体形状と高さ方向に積層ピッチ間隔で生成したXY平面群とが交差する断面を計算することで, 各レイヤの輪郭を作る. この輪郭をノズル幅の間隔ずつ内側にオフセットして輪郭の内部を曲線で埋め尽くす. 以上の操作で, 積層ピッチの間隔で積み重なった密度100%のフレーム部分の造形パスが生成される.

次に, フレーム内に橋渡しされるブリッジを生成する. まず, フレーム全体のバウンディングボックスを計算して, これを塗りつぶすようにパラメータで指定された角度と間隔で並んだ直線群を生成する. そして, フレームの輪郭に相当する曲線と直線群との交点を計算し, 直線を分割することで, フレーム内のみを埋め尽くす線分を作る. この線分を指定された高さまで移動させてブリッジのための造形パスとする. なお, ブリッジの密度を高めるための工夫として, パスの中央を1.2 mm程度だけ持ち上げたアーチ形状にするオプションを追加した.

最後に, ブリッジを太さ制御が発生する部分で分割して, 制御用のパラメータを割り当てる準備を行う. この太さ制御を行う範囲は, UIコンポーネントからテキストを入力させてその輪郭を用いることとした (図6a). 入力されたテキストの輪郭はフレームとの接触がないもの

と仮定している. この輪郭を高さ方向に押し出して作られた壁とブリッジとが交差する点でブリッジを分割すると, その部分が奇数番目か偶数番目かでテキストの輪郭に対する内外判定が可能となる. この分割されたブリッジをひとまとまりに管理して, 後述するGcode生成コンポーネント内でパラメータを割り当てる.

4.2 Gcode 生成コンポーネント

Gcode生成はC#を用いて実装しており, 前述のパラメータやフレームとブリッジの造形パスを入力することで, 指定された作業フォルダにGcodeファイルを書き出す (図5b). 書き出されたGcodeファイルは, 通常の3Dプリンティングと同様に造形することができる.

このコンポーネントは, フレームの造形パスを底面方向から順に読み込んでいき, ブリッジが含まれている高さの層に到達したらフレーム上にブリッジを作るといった順序でGcodeを生成する. 造形パスをGcodeへと変換するために, まずは造形パスを一定間隔ごとに分割し, 分割された線分の始点と終点の座標および長さを求める. そして, ノズルを始点位置に移動する移動命令 (表1のG0およびG1命令) を作り, 終点の座標, Eの計算式で求めた樹脂量, 造形速度から造形のためのGcodeを作る. もし造形箇所が太さ制御を行うブリッジだった場合, Gcode中の樹脂量と造形速度を調整する.

造形を安定させる仕組みとして, ブリッジの造形開始前に一時停止命令を挿入して, 開始部分を緩やかに加速させるようにした. これはブリッジ造形の開始地点の加速によって始点付近が細く引き伸ばされることがあったためである. また, ブリッジを造形し終えたあとに次へ移動する際は, Z方向へノズルを3 mm程度持ち上げることで, 造形済みの部分との接触を回避するようにした.

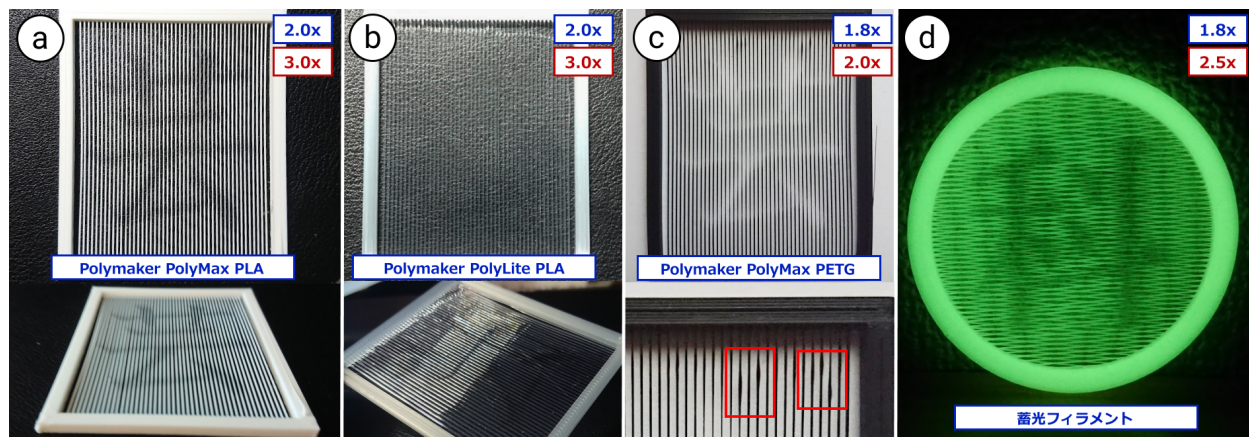


図 7 異なる材料でブリッジの太さ制御を行った例. 色や性質の異なる PLA (a, b) や PETG (c), 蓄光フィラメントなどで造形可能性を確認した (d). なお, 各図中の右上の青字 (上) は樹脂量の基準値, 赤字 (下) は太さ制御の倍率である.

4.3 システムに実装した機能

システムを用いてさまざまなブリッジ構造をデザインするために, いくつかの追加機能を実装した.

複数層のブリッジ: ここまでのブリッジはすべて 1 層分 (高さ方向の重なりがないもの) であったが, 十分な間隔があればブリッジを高さ方向に拡張することも可能である. そこで, XY 方向におけるブリッジの間隔に加えて, Z 方向の間隔も入力できるようにした. ブリッジを固定するフレームに十分な高さがある場合, システムはこの間隔の値を用いて高さ方向にもブリッジを生成する.

SVG ファイルの読み込み: UI コンポーネントを用いて, Rhinoceros 側で作成された曲線を Grasshopper スクリプトに読み込むことができる. そこで, SVG ファイルのデータを曲線としてインポートして, テキストの代わりに太さ制御の位置を決定するための範囲として使用するオプションを実装した (図 8b).

ブリッジ造形方向の回転: ブリッジの造形方向を 360 度回転できるような仕組みを実装した. これによって, フレーム内を埋めるブリッジのパターンが変化するだけでなく, 太さ制御が難しい箇所の微調整を行えるようになる (たとえば, 図 6 で「科」の長い縦棒を細く造形し続ける向きを避けるなど). また, 前述の複数層のブリッジが作られていた場合, それぞれの層のブリッジに対して角度を指定することが可能である. これによってブリッジを組み合わせてモアレを発生させることができる.

プレビューと強調表示: 最終的に作られる造形パスを Rhinoceros 上でプレビューできるようにした. 太さの

制御具合に合わせて, 2 段階の太さをもたせたパイプの形状にしておき, 画面上でも濃淡の変化やモアレの具合が確認できる (図 6c). また, 極端に長い, 短い間隔で太さ制御を施されたブリッジが含まれていた場合は, 造形の安定性が損なわれる可能性があるため, 該当箇所を赤く強調表示する機能も実装した (図 6d). 現在は, 性能調査で得られた値である 20 mm 以上の細いブリッジ, 4 mm 以下のすべてのブリッジに対して強調表示を行っている.

5 造形例

ここでは本手法を用いて出力した造形例として, さまざまな材料を用いて太さ制御を行った例とシステムに実装した機能を用いて作成した応用例を紹介する.

5.1 異なる樹脂での造形例

パラメータ探索でも用いた PolyMax シリーズの白色 PLA (図 7a), 比較的安価な PolyLite シリーズの透明度が高い PLA (図 7b), PolyMax シリーズの PETG 樹脂 (図 7c), そして蓄光フィラメント (図 7d) を用いた例を示す. これらはパラメータ探索で用いた Ender-2 Pro と Creality CR-10 V3 で造形しており, 3.5 節で述べたキャリブレーションを行うことで十分に対応可能であることを確認した. 白色 PLA と透明度が高い PLA は, 図 4a で用いたパラメータの組み合わせをそのまま使用しており, どちらの 3D プリンタでも問題なく造形が行えた. いずれも PLA 樹脂であるため, ノズル温度 200°C, ヒートベッド温度 40°C で造形を行った.

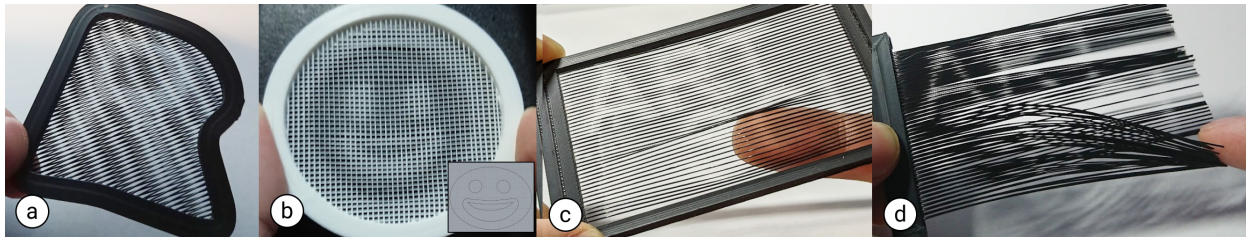


図8 フレーム形状に曲線を用いた例 (a) と SVG ファイルを読み込んで太さ制御に用いた例 (b). 出力物に触れることも可能であり、太さ制御された部分で凹凸を感じ取ることができる (c). ブリッジ部分の片側を切り離すことも可能である (d).

それぞれの材料と異なる 3D プリンタへの対応のために、パラメータの調整を行ったものもある。たとえば、PETG 樹脂に関しては推奨される造形温度が PLA 樹脂よりも高いことから、ノズル温度を 220°C、ヒートベッド温度を 70°C まで上昇させた。さらに、前述のパラメータで作成した Gcode をそのまま用いたところ、樹脂の押し出しが不安定になることが観察された。PETG 樹脂は造形温度や材料としての強度が高く、PLA 樹脂よりも押出が困難なためである。そこで、樹脂量の基準値を 1.8 倍まで落とし、太さ制御の倍率を 2.0 倍にして造形を行った。蓄光フィラメントでも細い箇所は造形中にブリッジが細くなりすぎることがあったため、樹脂量の基準値を 1.8 倍、太さ制御の倍率を 2.5 倍に調整した。

出力物を観察してみると、材料の性質と太さ制御の組み合わせによっていくつか特徴的な結果が見られた。まず、透明度が高い PLA (図 7b) は、一見すると本手法による影響が見られず、背景を黒や白にしても太さが変更された部分がわかりづらい。しかし、造形物に対して斜めに光を当ててみると、太さに応じて光の反射具合が変わり、文字に対応する位置で太さが制御されていることが観察された。PETG 樹脂は、パラメータの調整を行った上でなお押し出しが不安定になることがあり、図 7c 下部に示すように意図しない位置でブリッジが太くなってしまうことがあった。また、こちらは押出量と造形速度制御の倍率を下げたことにより、太い部分と細い部分の差が小さくなっている。これによって、全体が淡く、文字の部分の輪郭がぼやけるような効果が生まれている。蓄光フィラメントは UV ライトを照射することでしばらくの間発光する材料であるが、この発光の明るさ具合に造形物の太さが影響を与えている。一番明るいのはフレーム部分であり、続いて太く造形された箇所（次節で述べるモアレ部分が特に明るい）、そして細く造形

された文字の部分が一番暗くなっている。

5.2 システムの機能を用いて作成した造形例

図 8 にシステムに実装した機能を用いて作成した例を示す。材料はいずれも PolyMax シリーズの PLA を用いている。図 8a, b はブリッジを複数層重ねて造形した例であり、それぞれ 2 層目のブリッジの造形方向を 30 度と 90 度だけ回転させている。図 8a 中では、モアレと太さ制御による濃淡の表現が組み合わせられており、それぞれで表現された縞模様パターンと文字の両方を読み取ることができる。図 8b では、太さ制御に SVG ファイルの絵文字 (grinning face) を用いており、文字や単純なパターンだけでなくこうしたデザイン性のある表現も行えることを確認した。また、こちらブリッジの造形方向は 90 度での格子構造になっておりモアレは発生していない。フレームに張られている状態のブリッジは指先で触っても問題ない程度に安定して固定されている (図 8c)。太さ制御を行った部分に触れてみると、太さが変わった部分で質感に変化があり、僅かであるが指先で凹凸を感じ取ることができた。さらに、フレームから切り離して、先行研究の毛の構造 [2] のように改良することもでき、切り離した状態であっても太さ制御によって表現された文字が維持されている (図 8d)。そして、毛先に触れたときは全体が変形して、その部分の文字やパターンが見えなくなる。さまざまな材料やパターン、後処理を組み合わせることで、見た目はもちろん触感提示や毛の構造への応用なども期待できる。

5.3 複数の造形物の組み合わせと立体造形

図 9 に複数の造形物を組み合わせた応用例を示す。図 9a は、2 枚の円形の造形物を別途造形したフレームに重ねて固定したものであり、上側の 1 枚だけが回転するようになっている。それぞれの造形物には同じ文字 (A) が、異なるブリッジの造形方向で表現されている。この

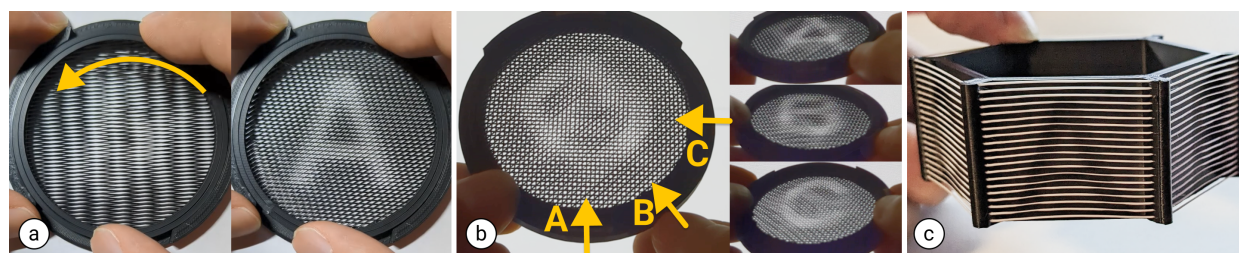


図9 複数の造形物を重ね合わせた例. 2枚の円形の造形物を重ねて、ダイヤルのように回すことで特定の位置でのみ文字を読み取れる (a). 異なる文字を表現した3枚の造形物を異なる角度で重ねることで、特定の方向に傾けたときのみ文字を読み取れる (b). また、立体造形の例として角柱の周囲にブリッジを造形した (c).

組み合わせによって、上側を回転させている最中はモアレ模様が断続的に発生し、特定の位置に到達したときのみ造形物内に表現された文字を読み取れるようになる. 図9bでは、3枚の円形の造形物を重ねている. それぞれの造形物には異なる文字 (A, B, C) が太さ制御で表現されており、ブリッジはすべて同一方向に造形されている. これを特定の方向 (図9b中の矢印方向) に傾けると、その方向に対して水平な位置関係にあるブリッジがより密になっているように見え、結果としてそのブリッジ内で表現された文字が見えやすくなる. また、図9cは角柱の周囲にブリッジを出力した立体造形の例である. 多色造形が可能な3Dプリンタ (JGMaker Artist-D Pro) を用いて出力しており、角柱を黒、ブリッジを白で造形した. ブリッジを高さ方向に並べることで本手法が立体形状にも応用できることが確認できる.

6 議論

6.1 本研究の新規性

熱溶解積層方式3Dプリンタならではのブリッジ構造における太さ制御を実現したところに本研究の新規性がある. 同方式で太さ制御を用いた造形法や作例はこれまでもあり、樹脂量の変更などのソフト的な方法だけでなく、ノズルを太くするなどのハード的な方法も取られてきた. しかし、ほとんどの場合は3Dプリンタのベッド上やすでに造形された部分の上に押し出す際の太さを対象としており、ブリッジという不安定な構造の中で実現できるかは明らかにされていなかった. 本論文では、まずこういった造形が可能であるという動作検証を行い、それを制御することを可能とし、手法の応用例として作例を示した. 材料や3Dプリンタが変わったとしても十分に再現可能であり、熱溶解積層方式3Dプリンタ

の新たな造形手法として活用できる可能性が示された.

6.2 制約

本手法で探索対象としたパラメータはGcodeのレベルで操作可能なもののみであり、3Dプリンタのファームウェアに記述されている内部的なパラメータは考慮しておらず、造形時の温度・湿度などの環境面についての影響も考慮できていない. また、探索方法も試行錯誤的であり、手法や環境に対して最適なパラメータが選べているとは言い難い. 一方、好意的にとれば、本手法をさらに改善できる余地が残っているとも言える. たとえば、加速度まで考慮した太さ制御が行えれば、太さが切り替わる部分などをさらに洗練させることができるだろう.

本手法で表現できる形状の複雑さにはいくつかの限界がある. まず、ブリッジ同士の間隔を1.2 mm程度に設定したことから、ブリッジ同士の間に位置する箇所表現が困難であり、図形の角張った部分や漢字の細い箇所などが欠落することがある. 次に、太さ制御が短距離で繰り返し生じる箇所では濃淡がはっきり表現されないため、たとえば画数の多い漢字などの表現は困難である. 最後に、本手法の太さ制御は、太い箇所・細い箇所の二値で制御されているため、二値化によって判別が困難になるような形状の造形は難しい. たとえば、人間の顔や写真などを詳細に表現することは困難である.

また、太さ制御によって細く出力された部分は他の箇所よりも脆く、僅かな変形でも影響を受けやすいため、出力後の造形物の品質について課題が残る. たとえば、本論文で掲示した出力例の中の一部で、フレーム全体が反り返るように変形し、ブリッジ部分が中央に向かって撓んでしまうものがあった. これは造形後に冷却されたプラスチックの収縮によるものであり、こういった微妙な変形がブリッジを含む全体の構造に影響を与える.

6.3 今後の展望

本論文では、ブリッジの太さ制御を芸術表現に用いることに注力したが、本手法によって作られる造形物にはさまざまな応用可能性があると考えている。

まず、ブリッジ構造で作られた造形物とディスプレイやスマートフォンとを組み合わせるという応用を検討している。ブリッジの間からその奥を透かして見ることができるため、ディスプレイに表示された内容と太さ制御による濃淡表現との組み合わせによって、さまざまな表現や入力手法が実現できるだろう。特に、造形物とディスプレイを組み合わせたモアレにはさらなる発展の余地がある。モアレは計測や位置推定などの手法 [10, 11] でも用いられており、本研究で造形したオブジェクトはこうした用途でも用いることができると考えている。

また、複雑な形状への対応方法として、ブリッジを XY 平面でオフセットさせながら積み重ねる方法を検討している。正面から見たときに、2 層目のブリッジが 1 層目のブリッジの間に来るような位置関係に造形することで、より高密度に造形したように見せることが可能となるだろう。さらに、濃淡表現の段階にも発展の余地がある。本論文では太い部分、細い部分という二値で濃淡表現を行ったが、図 3b, c で示したように、パラメータの調整具合によって複数の太さで造形を行うことができる。より多段階の濃淡表現を用いることで、複雑な形状にも対応できるようになるだろう。

本論文で紹介した造形例はすべて平面で作られていたため、このブリッジ構造を立体の造形物の一部に組み込むという応用を考えている。ブリッジを高さ方向に複数層にして造形できていることから、図 9c のように立体形状の側面に太さ制御を行ったブリッジを作ることで、3D プリンタを用いたハッチング [12] のような濃淡表現の手法へと発展させることができるだろう。

7 おわりに

本研究では、熱溶解積層方式 3D プリンタで造形可能なブリッジ構造において、造形中の樹脂押出量と造形速度を制御することによって、ブリッジの途中で太さを制御することを可能とした。太さの制御のために必要なパラメータを調査するとともに、樹脂や 3D プリンタが変更された際のキャリブレーション方法についてまとめた。調査結果に基づいて実装したシステムを用いてブ

リッジの太さ変化を用いて文字やパターンを表現する手法、ブリッジを重ね合わせてモアレを生じさせる手法などを実現し、さまざまな材料に対して手法が適用できることを実際の造形を通して示した。

謝辞

本研究の一部は、科研費 20H04231 の支援を受けた。

参考文献

- [1] Haruki Takahashi and Homei Miyashita. Expressive fused deposition modeling by controlling extruder height and extrusion amount. In *Proc. of CHI '17*, pp. 5065–5074, 2017.
- [2] 高橋治輝, 宮下芳明. ブリッジ構造と樹脂の引き伸ばしを用いた高密度な毛構造の造形手法. 第 25 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プ (WISS2017) 論文集, 2017.
- [3] 高橋治輝. 熱溶解積層方式 3d プリンタの造形手法を用いた「たんぽぽの綿毛」の制作. 芸術科学会論文誌, Vol. 18, No. 2, pp. 87–96, 2019.
- [4] 3dprintbunny (Twitter and Thangs username), 2023. <https://thangs.com/designer/3dprintbunny> (Accessed on 2023/5/8).
- [5] Jérémie Dumas, Jean Hergel, and Sylvain Lefebvre. Bridging the gap: Automated steady scaffoldings for 3d printing. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 33, No. 4, 2014.
- [6] Lingyun Sun, Jiaji Li, Junzhe Ji, Deying Pan, Mingming Li, Kuangqi Zhu, Yitao Fan, Yue Yang, Ye Tao, and Guanyun Wang. X-bridges: Designing tunable bridges to enrich 3d printed objects' deformation and stiffness. In *Proc. of UIST '22*, No. 20, 2022.
- [7] Haruki Takahashi and Homei Miyashita. Thickness control technique for printing tactile sheets with fused deposition modeling. In *Adjunct Proc. of UIST '16*, pp. 51–53, 2016.
- [8] Jack Forman, Mustafa Doga Dogan, Hamilton Forsythe, and Hiroshi Ishii. Defextiles: 3d printing quasi-woven fabric via under-extrusion. In *Proc. of UIST '20*, pp. 1222–1233, 2020.

- [9] Mark Wheadon. Velocity painting, 2017. <https://www.velocitypainting.xyz/> (Accessed on 9/15/2022).
- [10] Chang Xiao and Changxi Zheng. Moiréboard: A stable, accurate and low-cost camera tracking method. In *Proc. of UIST '21*, pp. 881–893, 2021.
- [11] Peiyu Zhang, Wen Ying, and Seongkook Heo. Fringer: A finger-worn passive device enabling computer vision based force sensing using moiré fringes. In *Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '22 Adjunct*, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [12] Tim Kuipers, Willemijn Elkhuisen, Jouke Verlinden, and Eugeni Doubrovski. Hatching for 3d prints: Line-based halftoning for dual extrusion fused deposition modeling. *Computers & Graphics*, Vol. 74, pp. 23–32, 2018.

高橋 治輝



2013 年明治大学理工学部卒業。2015 年同大学大学院理工学研究科新領域創造専攻博士前期課程修了。2018 年同大学大学院先端数理科学研究科先端メディアサイエンス専攻博士後期課程修了，博士（工学）。2018 年度より明治大学総合数理学部（先端メディアサイエンス学科）助教。2023 年度より立命館大学情報理工学部（実世界情報コース）に講師として着任，現在に至る。情報処理学会，芸術科学会，ACM 各会員。