

## 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

高橋治輝<sup>1)</sup>(正会員)

1) 明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科

## 3D Printed Dandelion Cotton using a Printing Technique of Fused Deposition Modeling

Haruki Takahashi<sup>1)</sup>

1) Department of Frontier Media Science (FMS),  
School of Interdisciplinary Mathematical Sciences, Meiji University

haruki @ meiji.ac.jp

### 概要

本論文は、熱溶解積層方式 3D プリンタによる「たんぽぽの綿毛」の作品制作を題材として、3D モデルに依存しない造形パスのデザインや 3D プリンタを用いた作品制作について報告するものである。熱溶解積層方式を用いた毛の造形の先行研究を調査するとともに、従来の造形手法では困難であった綿毛の形状や接触回避、安定した造形と量産を実現した。これら課題の解決方法について、具体的な制作過程とともにまとめる。制作と展示の結果を踏まえて、3D プリンタの扱い方やその可能性、3D プリンタを用いた作品制作について議論する。

### Abstract

In this paper, I report making of an artwork using a fused deposition modeling 3D printer: 3D printed dandelion cotton. I summarize related works on 3D printing techniques and design printing paths that allow a 3D printer to stably mass-produce a pappus. I describe a way of printing a pappus with actual design processes. Based on the making process and an exhibition, I discuss the capability of a 3D printer and a creation using a 3D printer.

## 1 はじめに

3D プリンタの普及に伴って、誰もが高精度な立体形状を制作できるようになった。入力データに相当する 3D モデルはネット上のデータベースからダウンロード可能であり、初学者の利用を想定したモデリング環境も整ってきている。特に、安価で扱いやすいことから、熱溶解積層方式がデスクトップ 3D プリンタの代表として話題を集めた。熱溶解積層方式の多くは、3D モデルの変換処理で得られる Gcode によって動作する。Gcode は CNC 機械の制御を目的とした低レイヤの言語であり、移動すべき座標や移動速度の記述で機械を動作させる。一般的な 3D プリンタの工程では人間による Gcode 記述が不要であるが、Gcode レベルでのパラメータ調整を駆使することで、3D モデルに依存しない表現が可能となる。こうした「造形手法」が 3D プリンタの可能性を拡張する方法のひとつとして研究されている。

造形手法を駆使した表現は、アーティストの作品に見ることができる。オーストリアの LIA<sup>1</sup> は、Filament sculptures と題した作品群を制作した。制作過程はブログ記事<sup>2</sup>にまとめられており、いずれも Gcode レベルでの 3D プリンタ制御によって実現されている。O' Dowd は造形手法を駆使した Textured 3D printing[1] について研究を行っている。「造形された材料は機械の動きの物理的な痕跡である」と述べ、3D プリンタを直接制御することで美的なテクスチャ表現を可能とした。造形手法に関する研究では、各パラメータについての性質をまとめた情報やデザインスペースが提供されており [2][3]、こうした情報をもとに Gcode を直接記述できるシステムも提案されている [4]。

熱溶解積層方式の造形手法の中でも、ノズルから溢れる樹脂を引き伸ばすことで実現する「毛の造形」は特に個性的なものである [2]。本研究では、具体的な作品として「たんぼぼの綿毛」を取り上げ、熱溶解積層方式 3D プリンタと毛の造形を用いた作品制作の過程を紹介する。毛を作り出す造形手法はこれまでも幅広く研究・実践されている。しかし、本作品を制作するにあたって以下の 3 点が新たな課題となる。

- 形状 綿毛の丸みを帯びた形状の実現および造形物と 3D プリンタ各部との接触回避
- 量産 造形時間や樹脂量の調整
- 安定 造形および展示時の安定性

<sup>1</sup><http://www.liaworks.com/>

<sup>2</sup><http://liasomething.tumblr.com/>








図 1: 3D プリンタで作成したたんぼぼの綿毛「∞ Fluff」。

たんぼぼの綿毛を構成する「冠毛」は、先端にかけて緩やかに弧を描いた形状をしているが、従来の方法では、3D プリンタとの接触回避などの理由から直毛の造形のみしか扱われていなかった。また、研究段階にある造形手法を駆使して、安定した形状を量産できるかという課題についても十分に検証されていない。本作品は 240 個の冠毛を備えているが、これらを安定して造形しつつ展示可能なものに作り上げることは、3D プリンタを用いた作品制作という範疇を超えて、研究課題としても取り組むべき価値がある。

本論文では、まず、毛の造形に関する既存研究の調査と比較を行い、前述の課題について整理する。そして、作品の要件とアイデアをまとめ、現在の 3D プリンタが抱える制約に基づいて行われたパラメータ調整や形状のデザインに関する知見を共有する。さらに、映像表現を得意としたビジュアルプログラミング言語のプラグインとして、与えられた頂点群を 3D プリンタの造形パスに変換するデザインシステムを実装した。システムを用いてデザインした冠毛の造形と完成した作品の展示結果を踏まえて、本研究の造形および 3D プリンタを用いた作品制作について議論する。

なお、本研究は 2019 年 1 月 12 日から 25 日までの 2 週間、Good Design MARUNOUCHI にて開催された JAID (Japan Automotive Interior Designers) 主催の「1kg 展」に出展された作品の制作について、3D プリンタに関する技術的側面を中心にまとめたものである。作品は、1 kg の材料を用いて作られた直径 1 m サイズの「たんぼぼの綿毛」である (図 1)。作品の鍵になる冠毛部分を熱溶解積層方式 3D プリンタの造形手法により実現した。

表 1: 毛の造形の比較

手法	Drooloop	Fiber bridging	Hairy lion	3D printed hair	High density hair
					
データ	3D モデル	3D モデル	3D モデル	Gcode	Gcode
太さ	ノズル口径程度	ノズル口径程度	ノズル口径程度	0.08mm 程度	0.08mm 程度
安定性	片側固定	両端固定	両端固定	片側固定	両端固定
密度	× 接触回避	△ 1 本が太い	△ 1 本が太い	× 接触回避	高密度化可能
後処理	不要	切断	切断・変形	不要	切断

## 2 関連研究

本研究の関連研究として、3D プリンタの造形手法に関する研究と毛の造形に関する研究について述べる。後者については、各手法の性質を詳細にまとめる。

### 2.1 3D プリンタの造形手法に関する研究

熱溶解積層方式 3D プリンタのパラメータを制御して、新たな造形を実現する造形手法に関する研究が盛んに行われている。こうした造形手法は、通常の 3D プリンタでは困難な形状や表現を実現する。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 [5] は、造形の高速度化を目的として提案された。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 [6] は、テクスチャ表現として活用できる。また、樹脂が溢れ出すオーバーエクストルージョン現象を造形物の表面デザインに応用する手法がある [7]。色調表現のための造形手法として、波打った壁面による表現 [8]、ハッチングを造形物表面に応用した表現 [9] があげられる。著者は、こうした造形手法研究を包括的に考えるためのシステムとして、パラメータ探索を目的としたシステムを提案した。3D プリンタが作り出す構造をシンセサイザで音色を作るかのごとくデザインできるシステムである [3]。また、Illustrator<sup>3</sup> のパスを変換することで Gcode を生成するプラグイン「Fabrix」[4] や、Grasshopper<sup>4</sup> 用の Gcode 変換プラグイン「Silkworm<sup>5</sup>」なども開発されている。

<sup>3</sup><https://www.adobe.com/jp/products/illustrator.html>

<sup>4</sup><https://www.grasshopper3d.com/>

<sup>5</sup><https://projectsilkworm.com/>

### 2.2 毛の造形に関する研究

#### 2.2.1 造形手法の詳細と比較

ノズルから溢れる樹脂を引き伸ばすことで実現する「毛の造形」は、熱溶解積層方式の造形手法の中でも特に個性的なものである。この造形手法について、これまでに実現された手法の詳細を表 1 にまとめた。なお、表 1 中の太さ・密度・安定性は、細く高密度な毛を安定して作れるかという観点で整理したものである。

まず、毛の造形が可能な仕組みの前提として、3D プリンタによるブリッジ構造の造形がある。ノズルから押し出された樹脂は順次冷却されて硬化するが、その両端が適切に固定されていれば空中であっても造形が行える。橋のような見た目になることから「ブリッジ」と呼ばれており、一般に細く硬い構造で作られる。

3D プリンタを用いた毛の造形手法の嚆矢として、表 1 に示したようなワイヤフレームの花弁を造形できる「Drooloop flowers<sup>6</sup>」がある。3D プリンタは、花の中央部分から外に向けて樹脂を引き伸ばし、数センチのところで中央へ引き返すように動作する。この動きによって、リング状の毛が中心から垂れるように付与される。造形データは、中央部分で片側が固定された梁が全方位に伸びた形状の「3D モデル」として共有されており、スライサを適切に設定することで 1 回の往復動作を作り出す。一般的なブリッジの造形を行っていることからノズル口径に依存した太さとなり、片側のみの固定になるため花弁の形状や大きさによって安定性が左右される。また、既造形部分との接触を避ける

<sup>6</sup><https://www.thingiverse.com/thing:240158>

ために配置に気を配る必要があり、密度を高めることは難しい。造形後の処理は不要である。

アーティストのLeonardは、2014年に「Fiber bridging」と呼ばれる造形手法を実践した。前述のブリッジ構造を並べて、毛の造形を実現する手法である。この方法を用いることで、ブラシの毛先のような造形物を得ることができる<sup>7</sup>。造形データは3Dモデルとして共有されており、スライサのパラメータ設定が必要である。また、一般的なブリッジ構造と同じ方法で造形を行うため、ノズル口径程度の硬質な毛となり、密度にも限界がある。両端が固定されていることから造形は安定するが、造形後に切断する作業が必要となる。

「Hairy lion<sup>8</sup>」は、2016年末に公開されて話題を集めた造形物である。ライオンの3Dモデルの周囲に筒状の壁を張り巡らせ、顔と壁面との間にブリッジ構造を作る。造形後に壁の部分を持ち離して、ヒートガンなどで熱することで鬣を作っている。Fiber bridgingと同様の手法であるが、円状の引き伸ばしや変形を活用することで毛の表現のバリエーションを増やしている。この造形手法を活用するデザインシステムとして、Hairizer<sup>9</sup>がOpenSCADスクリプトで実装されている。

これらの造形手法と比較すると、Laputによる3D printed hair[2]では毛の細さが際立っている。Gcodeを直接制御し、押し出した樹脂をノズルの先端で引き伸ばすように造形を行うことで、直径0.08 mm程度まで細く造形することができる。また、引き伸ばされた樹脂はノズルの繰り返し運動によって切断される。この手法は、これまでの毛の表現をGcodeの直接制御によって拡張したものであるといえる。一方で、切断後の毛は制御困難であり、ノズルとの接触を回避するために高密度化に課題が残るとされていた。

著者は高密度な毛の造形を可能とする造形手法を提案した[10]。3D printed hairのGcode制御とFiber bridgingの安定した構造とを組み合わせ、毛の細さと高密度化を両立させた。ノズルの動きによる切断を行わないため、造形後に切断作業が必要となる。

## 2.2.2 毛の造形の課題

毛の造形に関して、さまざまな手法が提案されており、造形の安定性や細さ、密度は制作する造形物に合わ

せて手法を選択できるようになっている。一方で、いずれの手法を用いたとしても、プラットフォームに対して垂直方向に毛を作ることは難しい。樹脂を高さ方向に引き伸ばすことはできるが、既造形部分とノズルやヒーターとの接触を避けなければならないため、まばらな構造しか作ることができない。光造形方式を用いた毛の造形手法であるCillia[11]は、垂直方向に積層することで毛を作るが、対照的にプラットフォームと平行になるような毛の造形は難しい。

本研究が目指す「たんぼぼの綿毛」におけるひとつの冠毛は、中央部分から半球状にゆるやかな弧を描いている。こうした造形後の形状にまで考慮した毛の造形は先行研究で行われておらず、後処理時に変形させることが主である。また、いずれの造形手法においても、量産可能な程度に信頼できる造形が行えるか、造形後の構造が安定するかなどについては検証されていない。高密度な毛の造形[10]を実現した際の著者の知見として、毛の造形には繊細な制御が伴い、十分に調整したとしても失敗が生じ得るものである。また、細く高密度に作ることによって、造形後の抜毛や意図しない変形も生じる。次章では、こうした課題と作品として要件を踏まえた綿毛のデザインについて述べる。

## 3 綿毛のデザイン

ここではたんぼぼの綿毛を構成する冠毛のデザインについて、満たすべき要件、造形パスの工夫、後処理の3点から実現可能なアイデアをまとめる。

### 3.1 全体像および要件

図1に示したように作品の全体像は、空中に吊るされた「たんぼぼの綿毛」である。作品を構成するひとつの冠毛には、以下のような要件を設定した。なお、展示会のコンセプトとして1 kgの重量が設定されており、いくつかの条件は展示会を主導するデザイナーらとの議論に基づいて決定された。

- 冠毛の広がり直径200 mm程度
- 弧を描くような形状で内側に満遍なく毛を広げる
- ひとつあたり3 g程度
- 量産可能な造形時間・樹脂量
- 綿毛の中央部分と茎は後で接着

<sup>7</sup><https://www.spyder3dworld.com/item/room-broom/>

<sup>8</sup><https://www.thingiverse.com/thing:2007221>

<sup>9</sup><https://www.thingiverse.com/thing:2306455>

これらの要件を満たしつつ、現実の綿毛に似せた冠毛を250個造形することを目指した。ここでは、通常の3Dプリントでは困難な形状の実現、重量や樹脂に合わせた調整、量産可能な方法の模索と個数への挑戦という課題が含まれており、デジタルファブ리케이션研究の題材としても価値がある。

### 3.2 造形パスの工夫

#### 3.2.1 綿毛の概形

造形には熱溶解積層方式3Dプリンタ NinjaBot NJB-200とCreality 3D CR-10Sを利用した。想定する綿毛の大きさ(200 mm)は、標準的な3Dプリンタのプラットフォームのほぼ全体を占有する<sup>10</sup>。また、造形された毛同士や3Dプリンタの各部との接触回避、弧を描くように形状を作るための工夫が必要となる。これらを考慮すると、図2のように、中心から外に向けてゆるやかな曲線を描くように引き伸ばす方法が考えられる。この造形方法は、著者が先行研究[10]で実践した両端を固定する手法で、片側をプラットフォームに接地させたものであるといえる。細く高密度な造形が可能であり、外側に向けた引き伸ばしにより、先端にかけて細くなる毛を作ることができる。

この構造では、Z軸方向の移動方向によって2種類の造形方法が考えられる。図2aは、中央に作った柱からプラットフォームに向けて樹脂を接地させる方法である。図2bは、壁面を作り、中央から壁面に向けて樹脂を引き伸ばす方法である。いずれの方法をとっても、中心から外に向けて広がるような形状を作ることができる。押出直後の樹脂は軟化しているため、図2bの方法を用いることで、樹脂を垂れ下げるような形状を作ることができるだろう。図2aの場合は、プラットフォームとの接地位置を変更することで毛の長さや形状に応じた調整ができる。さらに、図2aでは柱の造形に、図2bでは壁の造形に追加の樹脂量と造形時間がかかることとなる。壁面はある程度の厚みをもたせて造形する必要があるため、造形時間と樹脂量は図2bの方が多くなる。この差は、造形が数個単位であれば差し支えないが、数百個の単位で造形を行う場合に大きく効いてくる。この量産可能性という観点から、本研究では図2aの形状を採用した。

<sup>10</sup>造形に使用したNinjaBot NJB-200のプラットフォームサイズは200×200 mm、Creality 3D CR-10Sは300×300 mmであった。

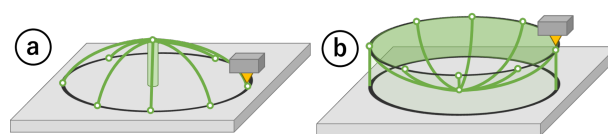


図2: 綿毛の概形。(a)中央に柱を立ててプラットフォームへと下ろす方法。(b)壁面を作って中央をプラットフォームに接地させる方法。

#### 3.2.2 樹脂の引き伸ばしと接触回避

図2aの形状で毛を引き伸ばす際に、接触回避と毛の太さの制御について調整を行う。接触回避に関する問題として、プラットフォームと毛の構造がなす角の角度(図3の $\angle P_s P_e C$ )に制限がある。熱溶解積層方式3Dプリンタのノズルの直上には、ノズルを加熱するためのヒーター(アルミ製のブロック)があり、造形中はこの部分が高温に熱される。また、ヒーターの周囲には温度制御のためのヒートシンクや冷却ファンも取り付けられている。つまり、造形が完了した毛と、このノズル周辺の機構との接触を回避する必要がある。ワイヤフレーム構造で造形を実現する先行研究[5]でも同様な課題を指摘しており、 $\angle P_s P_e C$ がなす角度32度が接触を回避するための閾値とされている。実際にNinjaBot NJB-200のノズル周辺を計測したところ同様に約32度であった。直径200 mmを目指して可能な限り大きな毛を作るとして、中央の柱の位置Cから毛の終点 $P_e$ までを100 mmに設定するとしよう。この32度を許容する場合、毛が真っ直ぐにプラットフォームまで向かったとして計算すると、中央の柱の長さHは62 mm程度にすることができる。

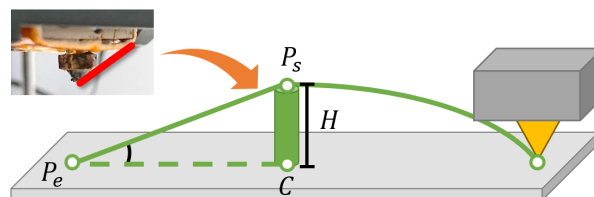


図3: 中心から樹脂を引き伸ばす様子。

しかし、実際にはここまで高い位置から樹脂を引き伸ばすことはできない。まず、毛の形状を緩やかにカーブさせるために、図3の右側への引き伸ばしに示すようにパスを制御する必要がある。この移動を行うことで、プラットフォームから取り外したあとの形状に癖をつけることができる。また、同じ位置から何度も毛を引き伸ばすと、始点 $P_s$ の周囲に樹脂が重なってしまう。

そのため、樹脂を引き伸ばすたびに少しずつノズルの位置を上昇させなければならない。そして、自然な綿毛を作成し、内側部分にも満遍なく毛を広げるために、さまざまな長さを含んだ毛の造形が求められる。具体的には、中心  $C$  から毛の終点  $P_e$  までの距離に 75 から 100 mm 程度のバリエーションを持たせているが、このとき、毛の終点  $P_e$  が中心  $C$  に近づくに従って、中心の柱の高さはより低く制限される。さらに、3D プリントの X 軸を制御する梁があるタイプのものでは、ノズルの先端がプラットフォームに接地する際に、既に造形された部分と梁との接触も回避する必要がある (図 4)。多くの 3D プリントは、高さ方向の移動を駆使した造形を想定していないため、機械の構成によっては可動域が大幅に制限される。実際に、ノズルを最下点に移動した Creality 3D CR-10S の梁の高さを計測してみると 26 mm 程度になっている。

これらを考慮し、中心の柱は 130 mm 程度と低めに抑え、毛を 1 本引き伸ばすごとに中央部分を 0.015 mm だけ上昇させるような仕組みとした (この上昇度合いも毛の本数や始点  $P_s$  での樹脂のたまり具合に従って調整を行った)。毛は最も短い部分で中央  $C$  から 75 mm 程度、最も長い部分で 100 mm になるように生成することとした。この設定であれば、造形物と 3D プリントとの接触を回避しつつ造形を行うことができる。

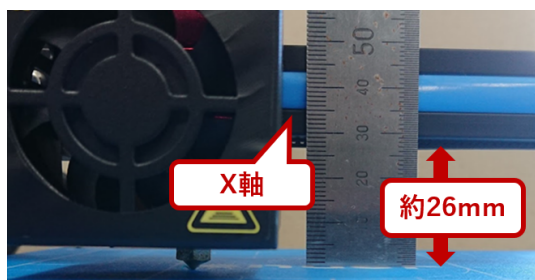


図 4: プラットフォームと X 軸の梁との位置関係。

### 3.2.3 樹脂の引き伸ばし時のパラメータ制御

中央の柱から樹脂を引き伸ばす造形パスをプレビューした様子を図 5 に示す。弧を描くように移動したノズルは、プラットフォーム上に終点を固定し、Z 軸方向に移動してから中央へと引き返す、という動きを繰り返す。3D プリントを制御する Gcode は直線移動から構成されるが、弧を描くために始点  $P_s$  と終点  $P_e$  の間にいくつかの経由点 ( $P_1, P_2, P_3$ ) を作っている。これらの位置関係は、始点  $P_s$  から 10% の位置を点  $P_1$ , 30% の

位置を点  $P_2$ , 50% を点  $P_3$  としており、4 つの移動に分割した。また、各経由点に向かうたびに Z 軸方向に 2 mm ずつ上昇させて弧を描かせた。

先行研究 [2] では、毛の造形時に樹脂の押し出しを行っていなかったが、本研究の造形では微量の樹脂を押し出しながら毛を引き伸ばす。樹脂押し出さずに引き伸ばすほうがより細い毛を作ることができるが、その一方で冠毛の形状を維持することが困難になるためである。ここでは、ノズル口径 0.4 mm、積層ピッチ 0.4 mm の設定で計算される樹脂の押し出し量を基準として、移動のたびにこの基準値に対する倍率として樹脂量を減らすように設定した。また、移動速度も始点付近では低速に設定し、造形の安定性を確保した。たとえば、Creality 3D CR-10S と Zortrax Pure White ABS 樹脂で調整を行った場合は、始点  $P_s$  と点  $P_1$  間で 1.2 倍の樹脂量 (300 mm/min)、点  $P_1$  と点  $P_2$  間で 0.5 倍 (500 mm/min)、点  $P_2$  と点  $P_3$  間で 0.3 倍 (750 mm/min)、点  $P_3$  と終点  $P_e$  間で 0.1 倍 (750 mm/min) とした。この設定で造形を行うと、中心付近に低速で押し出された樹脂が頑丈に接着し、先端に向かうほど細くなる。なお、これらの数値は使用する 3D プリントや樹脂によって異なることがわかっており、適宜調整が必要である。また、熱溶解積層方式の樹脂量の計算については、樹脂量制御を活用した先行研究 [6] などを参考にされたい。

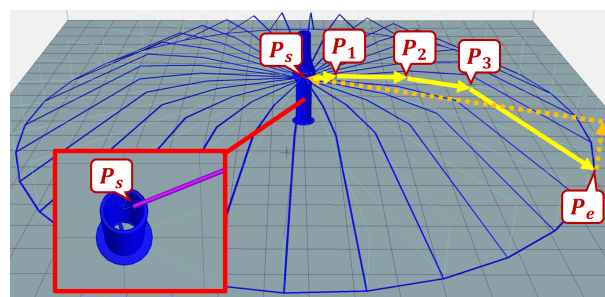


図 5: 樹脂を引き伸ばす際の造形パス。説明のために毛の本数が少ない状態でプレビューしている。

### 3.2.4 プラットフォームとの接地・変形

中央から伸ばした毛は、3D プリントのプラットフォームに接地させる。プラットフォームには、マスキングテープを貼った上でスティック糊を塗布し、造形中に毛先が剥がれることがない程度に接着具合を補強する。この方法は、毛と柱の造形以外に樹脂や造形時間が不要なため、量産に適している。一方で、糊の付着やプラットフォームへの押し付けによって、造形完了後の

綿毛をプラットフォームから剥がす際に、毛先が乱れることがわかった。また、作成した綿毛の成形や運搬を考慮すると、毛先を保護するためのサポートがあるとより安定すると思われる。そこで、毛が接地する部分をつなぎ合わせたリングを先に造形しておき、そこへ毛先をこすり付けるように造形する。このリングは、綿毛の構造とともに取り外す事が可能であり、取り外すまで毛先を保護することができる。

このプラットフォームとの接地方法を工夫することで、造形後の変形なども考慮した形状をデザインできる。たとえば、図6に示すように、毛先の接地位置と中央の柱の周囲にリングを作り、柱から伸ばした毛と中央のリングとをつなぎ合わせるように造形を行う。このリングを使用して造形後に綿毛を中央に引き出すことができる。こうした方法で、造形後の冠毛に後処理を加えることもできるだろう。

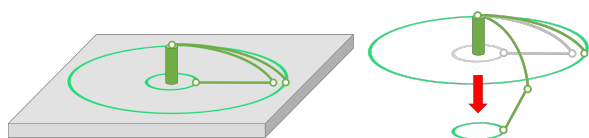


図 6: 造形後の変形を考慮した造形パスのデザイン。

### 3.3 後処理

造形パスの動きによって弧を描くよう形状が作れるものの、接触回避のための調整などにより、内側にまで広がりを持った冠毛は作れない。そこで、先行事例でも多く活用されていた後処理を行い、最終調整を行うこととした。具体的には、リング部分に接続された毛先の切断と治具を使用した変形を行う。

毛先はリング部分に僅かに接着しているのみであるため、千切るように引き剥がすことができる。この部分をカッターやハサミなどで切断することで、毛先がより細やかに整う。さらに、穴が空いたカップのような治具を使用して、造形後に成形を行った。カップは毛の全体が収まるサイズであり、内側と外側の毛で大きさの異なる2つのカップを順番に用いてドライヤーで成形を行った。なお、リング部分と中央の柱はこの後処理の際に廃棄される。

## 4 造形

前章のデザインに従って、さまざまな綿毛の造形を実施した。ここでは、いくつか代表的な造形例を示し

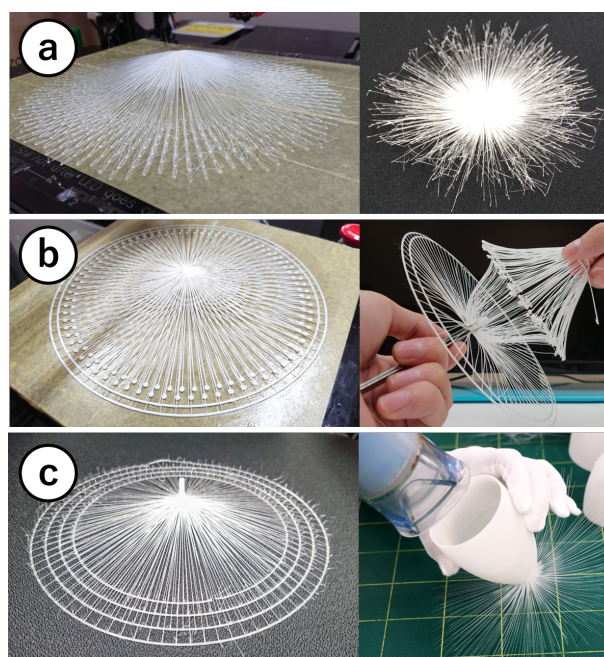


図 7: 造形の結果。(a) プラットフォームに接地させた場合。(b) 変形を考慮した形状。(c) 最終的な冠毛と治具を用いた形状。

ながら綿毛デザインの結果について述べる。樹脂は、Polymaker PolyMax PLA, Zortrax Pure White ABS, MUTOH MF500 用透明フィラメントなどの白、透明系の樹脂を複数使用した。造形温度は、各樹脂で推奨される温度に設定し、プラットフォームにはマスキングテープと糊を塗布した。造形パスの作成には、Gcode を直接記述できるシステムを実装して使用した（詳細は次章で述べる）。

図7に、造形結果の一部を示す。図7aは、プラットフォームに直接接地する方法で造形されたデザイン初期の綿毛であり、少ない樹脂量で造形されている。最初期は、毛の細さや量産時の手間を優先した設計を行っており、2章で紹介した先行研究の知見をそのまま採用した物となっていた。ここから、先に造形したリングに接地する方法へと変更するとともに、1本の毛が十分に安定するような樹脂量へと調整を行った。図7bは、試行錯誤の過程で作られた変形を考慮した構造である。図6で想定したとおりに綿毛を引きずり出すことができている。一方で、この方法では毛先の処理の手間や廃棄される樹脂量が増えることもわかった。

図7cは、最終的な綿毛の造形結果である。十分な密度の綿毛を作るために、ひとつの冠毛に対して360本の毛を造形することとし、4周分のリングのそれぞれに

90本ずつの毛が接地するように造形を行った。これをリングごとに引っ張り出し、治具とドライヤーを用いて成形を行った。

最終的な決定に至るまで、およそ2ヶ月の試行錯誤期間があった(図8)。この期間に、図7の造形や樹脂の選定、毛の太さと本数の調整、変形用の治具の製作などを行った。樹脂は毛の安定と色味を重視してZortrax Pure White ABSを選択した。造形時間はひとつの冠毛あたり2時間を要し、全体の樹脂量は1,291 mm、廃棄される部分(リングと中央の柱)は515 mmとなった。冠毛ひとつあたりの重量も3gを割る程度になり、作品の満たすべき要件を満足させるものが作れるようになった。



図 8: 試行錯誤と成形作業の様子。

## 5 実装

作品制作のために、ビジュアルプログラミング言語 vvvv<sup>11</sup>のプラグインとしてシステムを実装した(図9)。vvvvは映像表現やインスタレーションのために特化したビジュアルプログラミング言語であり、そのための機能がノードという単位で用意されている。これらの間を流れるデータをリンクで接続することで、レンダーに映像を作ることができる仕組みである。

図9に、このプラグインを使って生成した綿毛の様子を示した。図9中のPathの部分がこの造形パスを生成するための頂点データを作る部分である。vvvvは反復的な頂点の生成や制御に秀でており、円状に頂点を分布させたものを異なる半径で広げるといった制御が容易に行える。生成された頂点は3次元座標の情報を持ったベクトルのリストとして扱うことができる。実装したプラグイン“Path2Gcode”は、この頂点を受け取ってGcodeに変換するノードとしてプログラム上に読み込まれている。

このプラグイン“Path2Gcode”は、他のノードと同様に入力と出力を持っている。入力として、頂点のリ

<sup>11</sup><https://vvvv.org/>

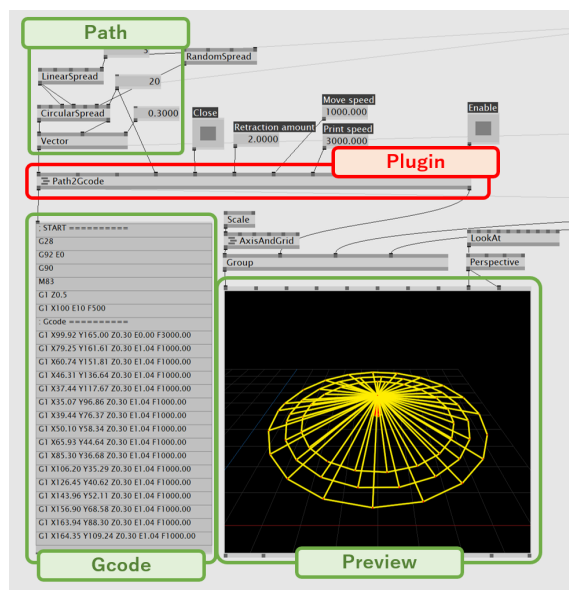


図 9: パスから Gcode を生成するシステム

スト、頂点の部分集合、頂点で作る曲線を閉じるかどうか、Gcode生成のパラメータ(移動速度、樹脂量割合、積層ピッチ、ノズル口径、フィラメント直径)を受け取る。ここで、頂点の部分集合は、頂点のまとまり方を決めるための数値群である。たとえば、図9のプレビューにあるような、「20個の頂点で構成された異なる半径の円を3つ作る」ことを考える。これを構成する頂点は、vvvvの標準ノードCircularSpreadとLinearSpread<sup>12</sup>を使用することで容易に生成できる。しかし、この状態では円を構成する頂点の座標情報のみで、20個ずつの頂点群が3つの円を作る構造に関する情報はなく、すべての頂点が順番に連結しているものとみなされる。もし「ある円から別の円に移動するときには樹脂を押し出さないようにしたい」場合は、いくつの頂点群がひとつの円を作るか、という部分集合に関する情報が必要となる。これが、頂点の部分集合を決定する入力であり、ここに20を設定することで、頂点のリストが20個ずつのまとまりになっていることを明示できる。また、複数の値を与えることも可能で、{20, 40}であれば、20個の頂点から作られた1つの円と40個の頂点から作られた2つの円と解釈される。

出力として、Gcodeとプレビューのための映像データを書き出す。このGcodeをファイルとした保存した

<sup>12</sup>Spreadは指定された中央値と幅を用いて、円状・直線状などに分布する頂点を指定した個数だけ生成する機能である。この場合は、CircularSpreadで円状に頂点を生成、さらに幅(半径)の値にLinearSpreadを割り当てることで複数の円を生成している。



り，コピー&ペーストしたりすることで熱溶解積層方式 3D プリンタの造形に利用できる。

## 6 議論

綿毛のデザインと造形を踏まえて，3D プリンタを用いた作品制作と展示，量産とパラメータ調整について議論を行う。

### 6.1 3D プリンタを用いた作品制作と展示

綿毛のデザイン確定のためのトライアルを経て，約 1 ヶ月の量産期間で 250 個の綿毛を作成した。造形された冠毛は，3D Systems 社の SLS 方式 3D プリンタで造形された中央部分に，直径 2 mm のアクリル棒の茎とともに接着された。内部には電球が装着された状態で吊り下げられ，直径 1 m，重量 1 kg のたんぼの綿毛「∞ Fluff」として完成した。国内の自動車メーカー 8 社のカーインテリア，カラーデザイナーによる展示会「1kg 展」は好評を博し，2 週間の展示期間に 5000 名を超える来場があった（図 1）。

本作品の展示にあたって，来場者には積極的に作品に触れるように勧め，綿毛の質感を体験するように促した。繊細な構造をもった作品であり，展示条件の自由度も高かったが，2 週間の展示期間を大きな破損や綿毛の欠損もなく乗り切ることができた。これは，樹脂選択や綿毛デザインにおけるパラメータ調整の結果である。中心付近の樹脂の量を増やすような調整を行い，毛の細さと 1 本ごとの安定性を両立できるような調整によって，長期の作品展示に耐え得る構造となった。

冠毛の造形には 3D モデルを使用しておらず，Gcode の直接記述とそのためシステムを用いて造形データを作成した。先行研究で培われた知見を参照するとともに，まだ取り組まれていなかった形状の造形を実現した。また，こうした造形手法を用いた量産可能性の検証と安定した造形，作品としての展示にも成功した。本研究を通して，熱溶解積層方式 3D プリンタの可能性を拡張し，作品制作の過程で実践することができた。

### 6.2 量産とパラメータ調整

量産のために，3 台の 3D プリンタ（NinjaBot NJB-200，Creality 3D CR-10S，エス.ラボ MothMach）を

使用した。いずれの 3D プリンタも熱溶解積層方式として十分な性能を持っている機種だが，樹脂との組み合わせや造形環境の違いがあり，同じ造形データを単純に使い回すことはできなかった。造形中の目立った問題として，造形速度と接着問題が挙げられる。本作品は，要求する冠毛の個数が多く，量産のために可能な限り高速な造形を試みた。しかし，一部の 3D プリンタでは正しく造形できる速度設定であっても，それ以外の 3D プリンタでは正しく樹脂押し出せないことがあった（樹脂を押し出すエクストルーダ内のステッピングモータに脱調が生じた [6]）。また，プラットフォームと造形物との接着が不十分であったために，毛を支えるリングが途中で剥がれてしまう問題がしばしば生じた。プラットフォーム側に糊を塗布しても発生したことから，高さ方向の精度やノズルの温度，樹脂の相性などによって生じる問題であると考えられる。

本研究における造形手法を構築する過程で，3D プリンタの制約に基づいた造形パスの生成方法とパラメータ設定の勘所についてまとめた。しかし，これらを現実的な状況下で運用し，3D プリンタの個体差に応じて調整を行う作業については課題が残る。本作品の制作における問題は，著者がシステム上のパラメータを適宜調整することで解決したが，こうした造形環境に応じて 3D プリンタの調整を行えるような人材とパラメータに関する理解が求められる。さらに，3D プリンタに対する認識も，与えられた 3D データを忠実に出力するための機械という見方から，「さまざまなパラメータ制御で多様な表現が可能な機器」へと改める必要がある。

## 7 おわりに

本論文では，熱溶解積層方式 3D プリンタによる「たんぼの綿毛」の作品制作を題材として，造形のためのパラメータ調整や綿毛の造形を実現する Gcode 生成について報告した。毛の造形を実現する先行研究と 3D プリンタの仕様に基づいて，綿毛の造形パスをさまざまな可能性を踏まえながらデザインした。綿毛全体の構造や樹脂の引き伸ばしと接触回避，プラットフォームとの接地の仕方，造形後の変形と，造形工程全体について検討した。検討した造形パスを記述するためのシステム，複数の 3D プリンタと樹脂を用いて試行錯誤を繰り返して，量産を行った。最終的にひとつの綿毛へと集約された作品は，2 週間に渡って展示された。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、明治大学総合数理学部教授の宮下芳明先生にアドバイスをいただきました。本研究で扱った作品は、日産自動車（株）デザイン本部の中島小百合さま、高木陽介さまの主導のもと制作されました。株式会社 DiGiTAL ARTISAN の小野正晴さまには、制作・量産にご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] Paul O’Dowd, Stephen Hoskins, Peter Walters, and Adrian Geisow. Modulated extrusion for textured 3d printing. *NIP Digital Fabrication Conference*, No. 1, pp. 173–178, 2015.
- [2] Gierad Laput, Xiang ’Anthony’ Chen, and Chris Harrison. 3d printed hair: Fused deposition modeling of soft strands, fibers, and bristles. In *Proc. of UIST ’15*, pp. 593–597, 2015.
- [3] 高橋治輝, 宮下芳明. 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. *インタラクシオン 2018 論文集*, pp. 135–144, 2018.
- [4] H. Tanaka S. Koda. Direct g-code manipulation for 3d material weaving. Vol. 10167, pp. 10167–10167–7, 2017.
- [5] Stefanie Mueller, Sangha Im, Serafima Gurevich, Alexander Teibrich, Lisa Pfisterer, François Guimbretière, and Patrick Baudisch. Wireprint: 3d printed previews for fast prototyping. In *Proc. of UIST ’14*, pp. 273–280, 2014.
- [6] Haruki Takahashi and Homei Miyashita. Expressive fused deposition modeling by controlling extruder height and extrusion amount. In *In Proc. of CHI ’17*, pp. 5065–5074, 2017.
- [7] 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 プリントのための造形手法. *芸術科学会論文誌*, Vol. 15, No. 5, pp. 194–207, 2016.
- [8] Tim Reiner, Nathan Carr, Radomr Mch, Ondrej t’ava, Carsten Dachsbacher, and Gavin Miller. Dual-color mixing for fused deposition modeling printers. *Computer Graphics Forum*, Vol. 33, No. 2, pp. 479–486, 2014.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Jifei Ou, Gershon Dublon, Chin-Yi Cheng, Felix Heibeck, Karl Willis, and Hiroshi Ishii. Cillia: 3d printed micro-pillar structures for surface texture, actuation and sensing. In *In Proc. of CHI ’16*, pp. 5753–5764, 2016.

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，博士号（工学）取得。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に助教として着任，現在に至る。情報処理学会，芸術科学会，ACM 各会員。