

繊維3Dプリンタのオーバーハングに対応する造形手法

野崎 玲那¹ 宮下 芳明¹

概要: 本稿は、繊維のみで構成された造形物の3Dプリントにおけるオーバーハングに対応する造形手法を提案する。積層造形において、外に張り出した形状を指すオーバーハングの部分の造形するためには、造形層を支えるための土台として造形物とは別にサポートを作成する必要がある。本手法では、シート状の綿から造形面とその周囲の余白をレーザーカッターで切り取り、それを積層しながらフェルティングニードルと呼ばれる繊維を絡ませる特殊な針で刺して造形する。その際に、造形面の周囲の余白も同様に積層してサポートとして使用する。このとき、造形物からサポートが取り外せないことや、層同士が結合せず離れてしまうことがないように、上下の綿2層を過不足なく結合する必要がある。そのため綿同士の結合度とフェルティングニードルを刺す深さ及び一点を刺し続ける関係について調査を行い、適切な条件を導いた。また造形実験によって、本手法が繊維のみで構成された造形物の3Dプリントにおいて、オーバーハングに対応可能であることを示した。

1. はじめに

1.1 研究背景

近年3Dプリンタ及び3Dプリント技術は急速に普及している。結果、一般のユーザに自動で正確な造形手法を、工業の世界に安価で新しい造形手法を与えた。造形の最適化や表現拡張などの研究が現在までに積み重ねられ、プラスチックや金属などにおいては大きいものから複雑なものまで様々なものが造形可能になった。一方で、繊維3Dプリンタに関しては現在発展の途中にあり、未だ主要な造形手法すら確立されていない。最終的に衣服や家具などを出力可能にするためにも、今は造形手法において議論を重ねるべき段階にある。本稿は、繊維造形における造形方法に関する探求の一つとして位置づけられる。

布や繊維は、肌触りの良さや吸湿性から衣服や家具など人間の肌に近い場所で様々な用途で使われている。また、Human Computer Interaction (以下HCI) の分野の中でもヒューマンマシンインタフェース [1,2] やパーソナルファブリケーション [3] の領域でこれらの素材に着目した研究は広く行われている。繊維3Dプリンタが発展し、繊維造形に3Dプリンタという選択肢が足されることでこれらの研究にも貢献できると考えられる。

積層造形法とは底から始めて上に向かって連続で層を積みながら造形する手法である。その際、上層は下層の断面を支持層としてその上に積み重ねられる。このとき、下層に支持層がない状態はオーバーハングと呼ばれる。本稿で

はオーバーハング状態の部分をオーバーハング部と呼ぶ。一般的に、オーバーハング部を造形するためには造形層を支えるためにサポートを作成し、造形後除去する。

現在提案されている繊維3Dプリンタに関する先行研究 [4,5] では、造形できる形状や造形物の見た目に大きな制限があり、繊維以外の素材を使用せずオーバーハングに対応する造形手法は未だ提案されていない。

1.2 本研究の目的と提案

本研究の目的は、繊維のみで構成された造形物の3Dプリントにおけるオーバーハングに対応する造形手法の構築である。これにより、繊維のみで構成された造形物の自動造形方法において、作成可能な形状の拡張を目指す。

本手法は、繊維を絡ませる特殊な針であるフェルティングニードルで羊毛やアクリルなどの繊維を刺し固める手芸である羊毛フェルトの技術を利用する。シート状の綿から造形面とその周囲の余白をレーザーカッターで切り取り、それを積層しながらフェルティングニードルで刺して造形する。綿を積層する際に、造形面の周囲の余白も同様に積層してサポートとして使用する。このとき、造形物からサポートが取り外せないことや、層同士が結合せず離れてしまうことがないように、上下の綿2層を過不足なく結合する必要がある。そこで本稿では、3Dプリンタのプロトタイプを作成し、これを用いてフェルティングニードルによる繊維の結合度と、フェルティングニードルを刺す深さ、及び1点を刺し続ける時間の関係について調査を行い最適条件を導く。また、調査結果を元に造形例を作成し、本手

¹ 明治大学

法で繊維のみで構成された 3D 造形においてオーバーハングに対応可能であることを示す。

本手法は、最終的に現在普及している FDM 方式 3D プリンタと近い規模のマシンで、近い程度に自動で造形が可能な状態を目指している。本稿では造形手法の妥当性について議論を行うことを目的としているため、プロトタイプは造形過程に手作業を含む不完全なものである。しかし、先行研究 [5] に倣った実装の工夫によって本手法による造形の自動化は可能であると考えられる。

2. 関連研究

2.1 布や繊維を利用した研究

Hamdan らは、布地に電子回路と素子を埋め込んだものである E-Textiles のデザインを、エンドユーザがデザインした刺繍パターンと統合することへの支援手法を提案した [6]。同時に刺繍マシンと導電性の糸を用いて電子回路を作るためのステッチパターンについて調査した。富永らは、羊毛フェルトを用いて、基板部まで柔らかい触感を保った入力インタフェースを提案した [1]。これにより、リラックスした空間に馴染むような操作感を実現した。Albaugh らは、横編機で腱になる糸を編み込んだ立体物を作成し、その腱で立体物の操作や状態の検出などを行う手法を提案した [2]。また、そのようなオブジェクトを作成するためのデザインパターンについて定義した。これらのインタフェースは導電性の糸を縫う、センサの外装に羊毛フェルトを巻きつけるなどの作業を手作業または工業用編み機で行っている。手作業の造形はユーザに高度なスキルを要求し、工業用の編み機は非常に高価であるため造形における試行錯誤ができるユーザは限られている。それに対し、筧らは反射型フォトフレクタで綿の密度を検出するモジュールを作成し、これを埋め込むことで任意の柔物体をインタフェースとして利用する方法を提案した [7]。柔物体は既製品のソファやまくらが想定されている。Takeuchi らは、水耕栽培用の土台を個人の需要に合わせてカスタム造形するために有用な素材、造形手法について調査した [3]。その中の有効な手法の一つに繊維造形 3D プリンタが挙げられている。本研究では、繊維のみで構成された造形物の 3D プrint において、オーバーハングに対応する造形手法を提案する。3D 繊維造形技術の発展は、このような分野に対して新たな造形手法を提供し、作成の自動化やエンドユーザへの普及など、分野の発展に貢献することができる。

2.2 布や繊維を用いて任意の立体形状を作成する研究

Plushie [8] はスケッチインタフェースの 3D モデリングソフトで作成したモデルデータを元に、それをぬいぐるみにしたときの型紙をインタラクティブに生成するシステムである。これより、パターンメイキングの知識が無い初心者でもオリジナルの人形を簡単に作ることが可能になっ

た。ユーザは生成された型紙を元に手作業でぬいぐるみを製作するため、ある程度の裁縫技術が要求される。

工業用の編み機は、入力があれば人の手を借りずに繊維オブジェクトが可能である。しかし、編み機に入力するデータの作成には専門的な知識が必要で、デザインを命令群に落とし込むことは簡単ではない。Hofmann らは、手編みの文脈で用いられている編み方の言語を、編み機で使用可能な命令群に変換するコンパイラを作成した [9]。これにより機械編みで表現可能なパターンの幅を拡張した。McCann らは、工業用の編み機に用いる編み図を視覚的に設計する支援システムを提案した [10]。また、Kasper らは工業用の編み機用のデザインを行う際に、形状と表面の模様デザインを単一のツールで行うための言語及びインタフェースを提案した [11]。2D の設計図を操作することでインタラクティブに糸の位置や造形物の形状をデザインでき、その後編み機用の命令群に変換可能である。複雑な形状の造形物もエンドユーザが設計し自動造形することができるが、作成には工業用の編み機が必要である。

2.3 FDM プリンタで柔らかい造形物を造形する研究

一方 FDM 方式 3D プリンタで、布や繊維を用いずに柔らかい造形物を作成する試みも行われている。プラスチックを素材とする 3D プリンタでは基本的に硬い造形物しか作成できない。そこで、形状や造形方法の工夫によって FDM 方式 3D プリンタを用いて柔らかい触感の造形物が作成されている。

FDM 方式 3D プリンタで柔らかい造形物を出力する際、課題の一つに使用している素材の硬さが挙げられる。薄く造形したプラスチックに弾性はあるが、複雑な形状をしている場合、一点に力が集中しそこから造形物が壊れる可能性がある。一方、破損しないよう内部を埋めて補強された造形物は、変形できる柔らかさや弾性を持たない。そこで、造形物に掛かる力に合わせて変形可能な構造の穴を開け、力を加えた際に変形するような造形の提案がされている [12]。Takahashi らは FDM 方式 3D プリンタを用いて、縦糸にあたる柱に細く引き伸ばした樹脂を交互に通して織る造形を行った [13]。これにより柔らかい一枚の布のような造形物を作成した。しかし、FDM 方式 3D プリンタの造形物は、その表面に繊維特有の手触りを持たない。Rivera らは、家庭用 FDM 方式 3D プリンタで電界紡糸法を利用した造形を可能にする手法を提案した [14]。電界紡糸法とは、帯電させた樹脂を噴霧させることで繊維状に加工する手法である。これにより、同一のプラスチック樹脂から一般的な硬い造形とフェルト状の造形を混ぜた造形物を作成可能になった。しかし、電気紡糸法が有効になる高さに制限があり、1.2 mm 程度の厚みまでしか造形できない。本稿では、繊維のみを用いて 3 次元の立体物をオーバーハング部まで造形する。

2.4 布や繊維を用いた 3D プリンタの研究

布や繊維で 3D プリントする手法の研究も行われている。Hudson は糸状の繊維をストローク状に引きながらフェルティングニードルで刺し固め、3D 造形物を作成する手法を提案した [4]。この手法ではサポートを作成できないため、オーバーハングが発生する複雑な形状は作成できない。Peng らは、フェルトを用いる造形手法を提案した [5]。レーザカッターを用いてフェルトから面を切断した後、フェルトを積み重ねてアイロンを用いて貼り合わせ、3D 造形物を作成する。フェルトは、片面にアイロン糊が貼られたものをロール状に巻いて使用する。このフェルトの端を別のローラで巻きだし、切断や積層などの一連の動作を自動で行う。この手法は積層に糊を使用しているため、これが見た目や触感に違和感を及ぼす可能性がある。本手法では、素材にシート状の綿を用いている。積層面を刺し固めた後、造形面周囲のフレームを除去せずに残しサポートとして使用する。層の結合にはフェルティングニードルのみが使用されるため、造形物は繊維のみで構成される。

3. 提案手法

3.1 造形手法概要

本手法の概要を図 1 左に示す。本稿では、シート状の綿（バイリーン KNF-650）を素材に用いる。綿は積層する前に、造形面とその周囲のフレームをレーザカッターで切り出す。この造形面を、フェルティングニードルでまんべんなく刺して結合させながら積層する。積層する綿はフレームごと積層する土台の層と、造形面のみを積層する中身の層に分けられる。土台の層は中身の層を 10 層造形するごとに挟む。この土台の層は、上層にあるオーバーハング部のオーバーする面を予め切り取り、そのみを上層の綿と結合させてサポートとして使用する。このとき、造形物からサポートが取り外せないことや、層同士が結合せず離れてしまうことがないように、積層した綿の上 2 層を過不足なく結合させる。フェルティングニードルで刺し固めて積層した層の高さは、一層 0.5 mm として算出する。造形中に積んだ綿が動かないよう、中心に穴を開けた軽い板でこの高さに綿を押さえる。板は 110 mm × 110 mm の中心に、50 mm × 90 mm の穴を開けたものを使用する。綿の結合は、フェルティングニードルをすばやく抜き刺しするパーツをプリントヘッドに持つ 3D プリンタで行う。その際の造形軌道は、造形する面の縁を固めた後にだんだんと中心に近づく同心円状の軌道（図 1 右）を使用する。また、フェルティングニードルの移動を一定の間隔で区切り、数秒その場に留める処理を行う。

3.2 要件定義

3.2.1 羊毛フェルト

フェルトなどの不織布の製法の一つに、ニードルパンチ

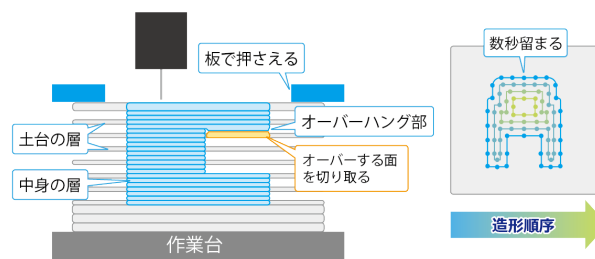


図 1 (左) 造形の概要 (右) 造形軌道の略図

法がある。これは、棘のついた針を繰り返し繊維に抜き刺しして上下に絡ませ、繊維の塊を作成する手法である [15]。羊毛フェルトとは、このニードルパンチ法の技術を用いた手芸である [16]。ニードルパンチ法と同様に、棘のついた針で繊維を繰り返し刺し、繊維の塊を成形する。羊毛フェルトは一般に普及した手芸であり、フェルト人形やポーチの袋、または布への刺繍などが作成されている。使用する針はフェルティングニードルと呼ばれる。フェルティングニードルは針先に複数個の棘があり、針を引き抜く際に繊維が引っかかる構造になっている。羊毛フェルトには、スライバーと呼ばれる繊維の向きを揃えて毛束状に束ねられた素材が主に使用される。スライバーとは毛束の状態を指す用語であり、繊維そのものはアクリルや羊毛など様々な種類のもので用いられる。羊毛フェルトの造形は、まず適当量のスライバーを作りたい形状より少し大きい程度に手で丸めて成形する必要がある。これは、フェルティングニードルで繊維を絡める際に表面が圧縮されて縮むためである。ある程度の形状を手で作ったものに対して、フェルティングニードルを繰り返し突き刺し成形を行う。繊維の絡まりはフェルティングニードルを刺した位置、刺した方向に発生する。また、フェルティングニードルは細く折れやすい。そのため、フェルティングニードルは造形物表面に対して法線の方向から刺すことが求められる。一般的に手作業で羊毛フェルト作品を制作する際には、造形物を手で回転させながら表面全体にフェルティングニードルを刺す。細かな凹凸を表現する際には、より凹ませたい部分に対して多くフェルティングニードルを刺し込み、強く繊維を圧縮させる。一度絡ませた部分の繊維を引き離すことは難しく、一度凹ませた部分を膨らませたい場合は直接スライバーを足して盛る必要がある。羊毛フェルト作品は、補強や形状記憶を目的に針金を芯に入れる、造形時間短縮のためにスポンジを芯材に使用する*1、などの例を除き、基本的に繊維のみで構成されている。本手法はこの羊毛フェルトの技術を用いる。

3.2.2 積層造形

本稿の目的は、繊維のみで構成された造形物の 3D プリントにおけるオーバーハングに対応する造形手法の提案である。現在、繊維造形は発展の途中であり、主要な造形方

*1 <http://makimakifelt.petit.cc/muscat2b/> (2019 年 12 月確認)

法すら定まっていない。本稿は、その繊維造形における造形方法に関する探求の一つとして位置づけられる。本稿は3Dプリンタを使用するメリットとして、家庭やファブ施設でエンドユーザが直接自動造形を享受できることを挙げる。FDMプリンタの文脈でも、外部に造形を委託して自宅に送付してもらうサービスなどがある。一方で、家庭や研究施設等で使用できる規模の3Dプリンタが普及し、誰でも利用可能なファブ施設が増えていることもまた事実である。ユーザが試行錯誤できることは、HCIや工業分野の発展だけでなく一般的な制作の在り方にまで変化をもたらしたと考えられる。本手法は、最終的に現在普及しているFDM方式3Dプリンタと近い規模のマシンで、近い程度に自動な造形が可能な造形方法であることを目指す。そこで、先行研究 [4,5] と同様に、積層造形法を用いた造形方法を提案する。

積層造形法とは底から始めて上に向かって連続で層を積みながら造形する手法である。その際、上層は下層の断面を支持層としてその上に積み重ねられる。このとき、下層に支持層がない状態はオーバーハングと呼ばれる。一般的に、造形の際にはオーバーハング状態の造形層を支えるために造形物とは別にサポートが作成される。サポートは造形後に除去される。

先行研究 [4] では、このサポートを使用した造形が不可能であった。本手法では、シート状の綿を素材に用いることで、繊維のみで構成された造形物の3Dプリントにおいて、オーバーハングに対応する。綿は積層する前に、造形物の断面とその周囲のフレームをレーザカッターで切り出す。この面を、フェルティングニードルでまんべんなく結合させながら積層する。積層する綿はフレームごと積層する土台の層と、造形面のみを積層する中身の層に分けられる。これは、フェルティングニードルで刺した綿と刺していない綿の厚みに大きく差があり、すべての綿の層を土台として残すと造形に支障をきたす恐れがあるためである。本稿で使用する綿（バイリーン KNF-650）の厚みは、通常約8~10 mm、フェルティングニードルで刺し固めた厚みは約0.2~0.5 mmである。後述のサポートとしての利用のためにも、土台の層の間に挟む中身の層はできるだけ少ない方がよい。よって本稿では土台の層は10層ごとに挟む。この土台の層のフレームをサポートとして使用する。その際、オーバーハング部下層のフレームから予めオーバーする面を切り取り、そのみを上層の綿と結合させる。造形では、造形物からサポートが取り外せないことや、層同士が結合せず離れてしまうことがないように、積層した綿の上2層を過不足なく結合させる必要がある。また、造形中に綿が動かないように中心に穴を開けた板で綿を押さえる。板は110 mm × 110 mm の中心に、50 mm × 90 mm の穴を開けたものを使用し、綿を潰さないよう十分軽い素材を用いる。綿の層は柔らかく、一般的なFDM方式3Dプリ

ンタで作成された樹脂層のように一意に定まる高さを持たない。そこで、フェルティングニードルで刺し固めて積層した層の高さは一層0.5 mmとして算出したものとし、板で綿を抑える高さもこの高さを用いる。

3.2.3 素材

本手法は柔らかいシート状の綿をフェルティングニードルで刺し固めながら積層して造形を行う。素材に他の布ではなくシート状の綿を用いる理由には以下が挙げられる。

- 織物の繊維は糸としてこよられているため、フェルティングニードルで下層まで引っ張られる繊維が少なく層を結合させることが困難である。
- フェルトは布としての強度を持たせるため、予め繊維が硬く絡まれており非常に密度が高い。そのため何層も重ねるとフェルティングニードルを刺すことが困難な硬さになる。
- 手芸綿や市販の羊毛フェルト用スライバーなどは、繊維そのものの塊であるため、積層造形の素材に使用するために一定量ずつ分け均一にならず工程が必要になり扱いづらい。

以上の理由により、素材には密度が高すぎずかつ一定の厚みにならされたシート状の繊維が適しているとする。本稿では、市販の素材でこの条件を満たすものとして繊維を固く絡ませていないキルト綿のバイリーン KNF-650を用いる。市販のキルト綿の中にも、強度を持たせるためフェルトと同様に予め固く繊維を絡ませているものも存在するがこれらは不適である。

3.2.4 造形軌道

3.2.2項で述べた造形方法を機械に行わせるために、フェルティングニードルをすばやく抜き刺しするパーツをプリントヘッドに持つ3Dプリンタを用いる。その際、造形面をまんべんなく刺し固めるためには、プリントヘッドを造形面を塗りつぶすように移動させる必要がある。本稿で使用する造形軌道の略図を図1右に示す。本手法のように、積み重なったキルト綿にフェルティングニードルが深く刺し込まれると、引っ張られた繊維が下層の綿まで引き伸ばされる。このときフェルティングニードルを刺した点には下向きの力が加えられ、逆にそこから離れた場所には上向きの力が加わる。綿は軽いので、針で刺した点から綿面の固定されていない端までの距離が近いと、その端の綿が持ち上がり折り込まれてフェルティングニードルの動きを止めてしまう可能性がある。この現象をできるだけ引き起こさないように、まず造形面の縁を固めた後にだんだんと中心に近づく同心円状の軌道を使用する。また前述したように、綿を結合させるためにはフェルティングニードルを何度も抜き刺ししなければならない。よって、フェルティングニードルの移動を一定の間隔で区切り、数秒その場に留める。留める時間は、4章にて調査を行う。

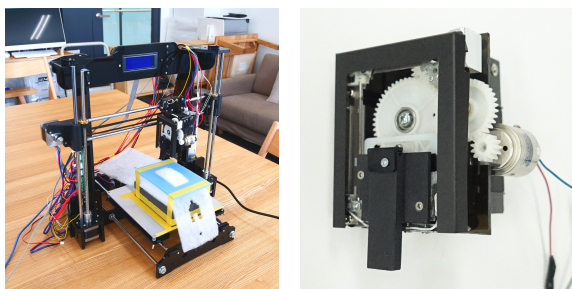


図 2 (左) プロトタイプ (右) フェルティングニードルをすばやく抜き刺しするパーツ

3.3 実装

3.3.1 プロトタイプ

本手法を用いて造形を行うために、3D プリンタのプロトタイプを作成した(図2左)。既存の3Dプリンタ(RepRap i3 P802M)を土台に、プリントヘッドにフェルティングニードルをすばやく抜き刺しするパーツ(図2右)を取り付けた。このパーツはモータで爪のついた歯車を回転させ、その爪で針の固定されたパーツを上下させる。針は一定の周期で単振動し、その往復周期は0.095 s、振幅は30 mmである。モータにはスイッチとDCジャックが接続されており、3Dプリンタと独立して動作する。フェルティングニードルは細く折れやすいため、綿に刺し込んだ際にプリントベッドにぶつからないように羊毛フェルトで使用されるスポンジの作業台をプリントベッド上に置く。さらにその上に造形に使用する綿と同じ綿を土台として積み重ねる。これは、オーバーハング部の造形をする際に土台の層の上で綿を結合させる場合とそうでない場合の条件を揃えるためである。土台として積み上げる綿は、プリントヘッドのフェルティングニードルを刺す振幅30 mmの高さを確保するため、刺し固めた綿の厚さを0.5 mmとして $30 \div (0.5 \times 10) = 6$ 層積み上げた。

造形中に綿を押さえる板はポリスチレンを用いる。これを手作業でスポンジの作業台に固定する。固定する高さは、前述した針で刺し固めた綿を1層0.5 mmとした造形物の高さを用いる。板の固定にはマスキングテープを使用する。また、1つのレイヤーを造形し終わるたびに、手作業で取り除くべきフレームの綿を取り除き、新たな綿を装填する必要がある。綿は予めレーザカッターで造形面とフレームを切り出したものを使用する。

本プロトタイプでは、綿のレーザカット・綿の除去および装填・綿を抑える板の位置調節の工程を手作業で行っている。綿のレーザカット、綿の除去及び装填については、Pengらがフェルトに対して自動化を行っている[5]。これはローラに巻いたフェルトの端を別のローラで巻き取ることで綿を装填し、3Dプリンタ上にあるレーザカット機構で切断したフェルトをローラごとプリントベッドに下ろし積層を行う。フェルトを貼り合わせた後ローラを持ち上げ、切り離されたフェルトを残し積層しないフェルトを除去

する。この機構は本手法にも適用できる可能性があり、これにより綿の装填やレーザカットの自動化が検討できる。また、綿を抑える板の位置調節については、マシンにおける針板のように板をプリントヘッドに結合させ、プリントヘッドの移動に合わせて位置を調節可能にするなどの実装の工夫で改善が見込める。そこで本稿では、人の手を借りずに本手法の一連の造形が可能かについては議論の範囲とせず、造形手法についての議論を行う。

3.3.2 制御

RepRap 3Dプリンタは、G-codeと呼ばれる制御コードでヘッドの動きを制御する。本稿では、3DモデルデータからG-codeを作成するCura Engine*2で出力したG-codeに編集を施したものを使用する。出力の際、Infill PatternをConcentric Linesにし、Infill Densityは60%とする。また、Layer Heightは層の高さと同じ0.5 mmとする。

G-codeの改造と3Dプリンタの制御はprocessingを用いて行った。まず、パスを一定の間隔で区切り、停止命令を挟む。プロトタイプのフェルティングニードルをすばやく抜き刺しするパーツは造形面上を移動している間プリンタと独立して動作するため、フェルティングニードルは絶えず抜き刺しが行われる。そこで、移動を区切る間隔はフェルティングニードルが綿に刺さっている間に移動が起こってもフェルティングニードルが折れない長さにする必要がある。そこで本稿では移動を区切る間隔は2 mmとする。さらに、3Dプリンタのプロトタイプに合わせて、フェルティングニードルを一番下まで下ろしたときに必要な深さまで綿に刺さる高さが造形の最下層の高さになるよう、Z軸の値を底上げする。また、中身の層のフレームを取り除く際、プリントヘッドが邪魔にならないように、造形する位置から持ち上げて端に寄せる動作を1層造形するごとに挟む。造形は層ごとに行い、1層造形を終えるたびに一時停止する。ユーザが実行を宣言することで次の層の造形を開始する。

4. 調査

4.1 調査目的

本手法は、シート状の柔らかい綿をフェルティングニードルを素早く抜き刺しするパーツを持つ3Dプリンタで上下に結合しながら造形する。3.2.1項で述べたように、羊毛フェルトではフェルティングニードルの棘のある範囲が綿を通過するように何度も綿に抜き刺しする必要がある。そこで、フェルティングニードルによる繊維の結合度と、フェルティングニードルを刺す深さ、及び1点を刺し続ける時間の関係について以下の仮説を立てた。

- 本環境において、重ねた綿同士の結合には、プリントヘッドを絶えず移動しながら造形するのではなく、あ

*2 <https://github.com/Ultimaker/CuraEngine> (2019年12月確認)

る1点に留まって複数回フェルティングニードルを抜き刺しする必要がある。

- フェルティングニードルを綿に刺し込む深さが深くなるほど綿の結合も深くなる。

本手法では、造形中に綿の結合が弱いと造形物は一体にならず、必要以上に深く結合させると土台の層から造形物が外せなくなってしまう。そのため、積み重ねた綿の上2層のみを過不足なく結合させることが求められる。そこで、プロトタイプの3Dプリンタを用いてフェルティングニードルによる繊維の結合度と、フェルティングニードルを刺す深さ、及び1点を刺し続ける時間の関係について調査を行い、最適条件を導く。

4.2 調査環境

綿はバイリーン KNF-650 を、フェルティングニードルはクロバーのフェルトパンチャー替芯スピード針^{*3}を使用した。このフェルティングニードルは、先端から3 mm～12 mmの範囲に棘を持つ。造形する綿は、予めレーザーカッターで110 mm × 110 mmのフレームに対して、中心に20 mm × 20 mmの正方形の面を切ったものを使用する。土台の1番上にあたる6層目も同様に20 mm × 20 mmの正方形の面を切り取った。この6層目の切り取った部分は、提案手法のオーバーハング部の直下にあたる土台の層のフレームからオーバーする分の面を切り取ったものにあたる。これら7枚の綿を、板で作業台に固定する。プリントヘッドの移動速度は225 mm/min、移動を留める位置の間隔は約2 mmとする。フェルティングニードルを抜き刺しするパーツの振幅は一定であるため、綿にフェルティングニードルを刺す深さは、積層した綿の上辺からプリントヘッドまでの高さで調節する。

4.3 パラメータの最適条件の調査

フェルティングニードルを刺し込む深さと1点を刺し続ける時間によって、どの程度の深さで綿が結合するかを調査する。フェルティングニードルを刺す深さ4種類(5, 20, 22.5, 25 mm)、1点を刺し続ける時間を3種類(1, 2, 3秒)の計4 × 3 = 12通りの試行を行った。それぞれのフェルティングニードルで1点を刺し続ける時間に対する[集中的に刺し込む点を刺す回数, 集中的に刺し込む点を中心とした前後2 mm未満の線分上を刺し込む回数]は、1秒のとき[約10回, 約18回], 2秒のとき[約21回, 約29回], 3秒のとき[約31回, 約39回]である。それぞれの造形結果において、目視で完全に結合しているとする層(図3左)の数を1点とし、完全ではないが結合の痕跡が見られる層(図3右)の数を0.5点として値を算出した。本手法では、上2層の綿が過不足なく結合することが求められているた



図3 綿の様子定義。(左) 図の中心で2層の綿のみが完全に結合している様子。(右) 造形面から2層下の土台の綿の裏面の様子。フェルティングニードルが繊維を押し出した跡である繊維の塊が数カ所見られる。

		1	2	3
針の振幅 (mm)	15	0	0	0
	20	0.5	2	2.5
	22.5	2	2.5	2.5
	25	2.5	3	4

図4 綿の結合深度のポイント。目視で確認して完全に結合しているとする層の数を1点とし、完全ではないが結合の痕跡が確認できる層の数を0.5点として値を算出した。値は2に近いほど理想とする。

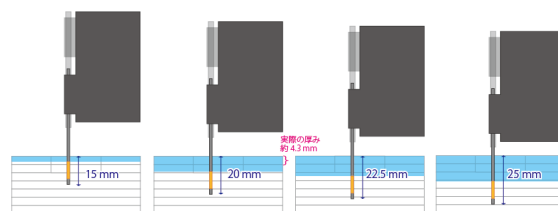


図5 4.3節で試行した各ニードルを刺し込む最大の深さで、綿にフェルティングニードルを刺し込んだ状態を横から見た様子。水色で塗りつぶされた範囲は、フェルティングニードルのすべての棘が通過した厚みを示す。

め、この点数が2点であることが理想的な状態である。以上の採点結果を図4に示す。

実験結果より、フェルティングニードルを刺す深さ、1点に刺し続ける時間はそれぞれ綿が結合する深さに比例していることが伺える。また、深さ15 mmの場合はほぼ結合が認められなかった。一方、深さ20 mm、22.5 mmの場合は上2層の過不足ない結合が認められ、25 mmの深さで造形した場合は2層以上結合した。

4.4 考察

前節で試行した各ニードルを刺し込む最大の深さで、綿にフェルティングニードルを刺し込んだ状態を横から見た様子を図5に示す。本環境における実際のフェルティングニードルで刺し固められていない状態の綿の厚み2層分は、 $30.5 \div 7 \times 2 \approx 8.7$ mmである。同様に3層分の厚みは約13 mmである。そして、フェルティングニードルを15 mm綿に刺したとき、先端から12 mmの位置にある棘の根本は綿の層の上辺から3.5 mmの位置にある。同様に

^{*3} <https://clover.co.jp/seihin/felt.html> (2019年12月確認)

20 mm 刺した場合は上辺から 8 mm, 22.5 mm 刺した場合は 10.5 mm, 25 mm 刺した場合は 13 mm の位置にあたる。ここで、使用したフェルティングニードルの棘の範囲 9 mm 分のおよそすべてが、綿の層 2 層分の深さを通過していかつ 3 層分の厚みをすべて通過していない、振幅 20 mm, 22.5 mm の場合は綿 2 層分の過不足ない造形が可能であった。同様に、棘の範囲 9 mm 分が綿 3 層分の厚みを通過している振幅 25 mm の場合は 2 層以上結合し、1 層分の厚みをすべて通過できていない 15 mm の場合は綿の結合が起きていない。よって本環境においては、使用するフェルティングニードルの棘の範囲が、綿 2 層分をすべて通過しかつ 3 層分をすべて通過しない振幅で造形することが望ましいと考えられる。また、ニードルを 1 点に刺し続ける時間は 1~2 秒間が適しており、それ以上刺し続けると必要以上に深く結合してしまうと考えられる。

5. 造形実験

本章では調査結果を元に本手法を用いて造形物を作成し、本手法で表現可能な形状についての検証を行う。フェルティングニードルは 20 mm の深さで 2 秒間刺し込む設定とした。

5.1 四角錐

3.2.1 項で述べたように、フェルティングニードルは、繊維を下層と絡ませて繊維同士を結合させる。このとき、造形層は下方向に引っ張られる。造形面の面積が小さいとフェルティングニードルを刺し込んだときに下層に巻き込まれる繊維が造形面の持つ繊維量に対して多くなる。また、面自体の質量も下がり、力が加わった際に浮き上がりやすくなる。そのため、フェルティングニードルを刺した位置から遠い綿は浮き上がり、この状態でフェルティングニードルが移動し次の点を刺そうとしても、本来あるべき造形層がその位置にないため造形ができなくなると考えられる。そこで、造形可能な造形層の面積の下限を求めるために、本手法を用いて四角錐の造形を行った。

底面 20 mm × 20 mm, 高さ 20 mm の四角錐を造形する(図 6 右)。造形層として出力された層は 37 層であった。1 層造形を行うたびに 4.3 節と同様に目視で層同士の結合状態を判別する。このとき、造形層がその下層と結合していない状態になった場合、著しく造形が困難な状態になった場合はその層で造形を終了する。造形結果を図 6 左に示す。結果、24 層目で造形層が下層と結合せずに浮き上がる様子が確認できた。24 層までの造形時間は約 3 時間 15 分ほどである。24 層目は約 7 mm 四方であり、23 層目は約 8 mm 四方であった。このことから、本手法では 8 mm 四方の正方形よりも小さい造形面の造形が難しいことが示された。

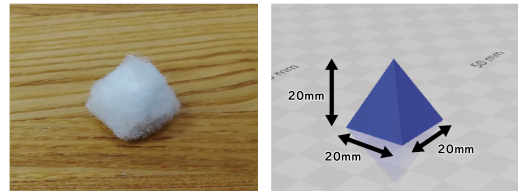


図 6 (左) 本手法で造形した四角錐。24 層目が浮き上がっている。(右) 入力データ

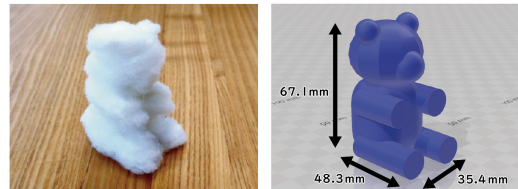


図 7 (左) 本手法で造形したくまのぬいぐるみ。図の状態に底にあたる層から上に向かって造形を行い、一度の造形で前に突き出した腕や頭の形を造形している。(右) 入力データ

5.2 くまのぬいぐるみ

図 7 左は提案システムで作成されたくまのぬいぐるみである。造形は図 7 右の 3D データを入力して行った。大きさは、35.6 mm × 48.3 mm × 67.1 mm である。これは図中の状態で底にあたる層から上に向かって一度の造形で作成した。造形不可能な層を除いた造形層は 132 層であり、造形時間は約 80 時間ほどである。このくまのぬいぐるみは、胴体から全面に突き出すように円柱型の腕と足、球状の尾があり、その上に球状の頭部、頭部から突き出すように口元、耳のパーツが存在する。腕のパーツは足のパーツの上に来るように配置されており、足と腕の間に土台がないためオーバーハング部となる。このくまのぬいぐるみは、サポートを用いなければ一度の積層造形で造形することができない。図 7 左の造形結果では、体から突き出した腕や尾などのパーツが胴体と一体になって出力されている。このことから、提案手法を用いてオーバーハング部を含む造形物を作成可能であると示された。

6. 議論

6.1 造形結果に関する議論

5 章の造形結果を元に、本手法が造形可能な形状、造形不可能な形状について議論を述べる。くまのぬいぐるみ(図 7)で示されるように、本手法が、繊維のみで構成された造形物の 3D プリントにおいて、オーバーハングに対応するという、既存手法にない表現を可能にしたことが示された。

5 章で作成した造形物の表面にはふわふわした綿のテクスチャが残っており、積層痕が確認できる。これは、羊毛フェルトのように造形物の様々な方向からフェルティングニードルを刺し込んでいないため、造形面の端は結合が甘くなり表面に柔らかいテクスチャが残りますやすくなると考えられる。一方で、ふわふわとしたテクスチャは繊維で構成

された造形物独自のものであるため、造形物の柔らかさを表現する必要がある場合には有用であると考えられる。また、本手法は土台の層と土台の層の間に数層分の余白が必要である。よって、土台の層と土台の層の間で激しくXY断面が拡大縮小するような、Z軸での高解像度を必要とする造形物は造形できない。以上のことから、本手法の造形では顔の表情などの細かい凹凸が求められる造形、寸法に正確性が求められる造形には向かないと考えられる。

先行研究 [5] のようにフェルトは何層も重ねると密度の高さからフェルティングニードルが刺さらなくなる。一方、本手法による造形物はフェルティングニードルを刺すことが可能な程度の硬さである。そのため、ユーザは造形後の造形物に手を加えることが可能である。造形後に、羊毛フェルトで行われるような表面を整える工程をユーザが行うことで、積層痕を目立たなくすることや、細かい凹凸表現を後から与えることも可能である。

6.2 造形手法の妥当性

フェルティングニードルで綿の層を結合させるためには何度も同じ場所を刺す必要があるため、本手法はFDM方式に比べて非常に造形時間がかかる。既存手法でもFDM方式での造形に比した造形時間の増加について言及されており、繊維造形における課題であると言える。また、その他の造形時間が長くなる要因の一つに、綿の装填を手作業で行うためにプリントヘッドを持ち上げて端に避ける動作が層ごとに必要なことが挙げられる。プリントヘッドを持ち上げて端に寄せ、また造形面上に移動させてヘッドをおろし終わるまでにかかる時間は、約20.6秒である。くまのぬいぐるみの132層分この動作が行われたとするとその時間は、2719.2秒、約45分19秒である。この時間は、3.3.1項で述べたように3Dプリンタの改善によって綿の装填の自動化を行うことで克服が見込める。

参考文献

- [1] 富永祐衣, 塚田浩二, 椎尾一郎: フェルト羊毛を用いた電子手芸手法の提案, 研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL), Vol. 2012, No. 16, pp. 1-6 (2012).
- [2] Albaugh, L., Hudson, S. and Yao, L.: Digital Fabrication of Soft Actuated Objects by Machine Knitting, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, ACM, pp. 184:1-184:13 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300414 (2019).
- [3] Takeuchi, Y.: Printable Hydroponic Gardens: Initial Explorations and Considerations, *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 449-458 (online), DOI: 10.1145/2851581.2892587 (2016).
- [4] Hudson, S. E.: Printing Teddy Bears: A Technique for 3D Printing of Soft Interactive Objects, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, New York, NY, USA, ACM, pp. 459-468 (online), DOI: 10.1145/2556288.2557338 (2014).
- [5] Peng, H., Mankoff, J., Hudson, S. E. and McCann, J.: A Layered Fabric 3D Printer for Soft Interactive Objects, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 1789-1798 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702327 (2015).
- [6] Hamdan, N. A.-h., Voelker, S. and Borchers, J.: Sketch&Stitch: Interactive Embroidery for E-textiles, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, ACM, pp. 82:1-82:13 (online), DOI: 10.1145/3173574.3173656 (2018).
- [7] 箕 豪太, 杉浦裕太, 杉本麻樹, 稲見昌彦: 綿を内包した柔物体を用いた日常生活に溶け込むインタフェース, WISS2010 予稿集, pp. 89-94 (2010).
- [8] Mori, Y. and Igarashi, T.: Plushie: An Interactive Design System for Plush Toys, *ACM SIGGRAPH 2007 Papers*, SIGGRAPH '07, New York, NY, USA, ACM, (online), DOI: 10.1145/1275808.1276433 (2007).
- [9] Hofmann, M., Albaugh, L., Sethapakadi, T., Hodgins, J., Hudson, S. E., McCann, J. and Mankoff, J.: Knit-Picking Textures: Programming and Modifying Complex Knitted Textures for Machine and Hand Knitting, *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, New York, NY, USA, ACM, pp. 5-16 (online), DOI: 10.1145/3332165.3347886 (2019).
- [10] McCann, J., Albaugh, L., Narayanan, V., Grow, A., Matusik, W., Mankoff, J. and Hodgins, J.: A Compiler for 3D Machine Knitting, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 4, pp. 49:1-49:11 (online), DOI: 10.1145/2897824.2925940 (2016).
- [11] Kaspar, A., Makatura, L. and Matusik, W.: Knitting Skeletons: A Computer-Aided Design Tool for Shaping and Patterning of Knitted Garments, *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, New York, NY, USA, ACM, pp. 53-65 (online), DOI: 10.1145/3332165.3347879 (2019).
- [12] STARted, b. C.: 3D Normcocre (2015).
- [13] Takahashi, H. and Kim, J.: 3D Printed Fabric: Techniques for Design and 3D Weaving Programmable Textiles, *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, New York, NY, USA, ACM, pp. 43-51 (online), DOI: 10.1145/3332165.3347896 (2019).
- [14] Rivera, M. L. and Hudson, S. E.: Desktop Electrospinning: A Single Extruder 3D Printer for Producing Rigid Plastic and Electrospun Textiles, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, ACM, pp. 204:1-204:12 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300434 (2019).
- [15] 篠原俊一, 福岡 強, 加藤哲也: 不織布活用のための基礎知識, pp. 38-39, 日刊工業新聞社 (2012).
- [16] 佐々木伸子: 羊毛フェルト基礎テクニック BOOK, 河出書房新社 (2008).