

導電性樹脂・磁鉄樹脂を用いた毛構造の3Dプリントと応用

鎌田 航誠^{1,a)} 高橋 治輝^{2,b)} 塚田 浩二^{1,c)}

概要: 本研究では、安価な熱溶解積層方式の3Dプリンタで造形可能な細かい毛の集合体（毛構造）を活用した毛構造の拡張について提案する。予備段階として、毛構造の密度や長さ等のパラメータを変更することで、先行研究の再現性を調査した。このパラメータ調査の結果を用いて、毛を使ったセンシングやアクチュエーションを行うために、導電性/磁性等を備えるフィラメントを造形に用いる方式や、柔軟に動かせるソフトレジンに毛を埋め込む方式の試作・提案をする。これらの方式によって特性が変化した毛構造を用いて触覚提示を行うための例についても紹介する。

1. はじめに

近年、3Dプリンタの造形技術の進歩により、低価格の3Dプリンタで数ミリ単位の細かい形状や複雑な構造の立体物を造形することが可能になった。特に、直径1mm以下の細長い毛のような造形物を熱溶解積層方式の3Dプリンタで造形することが可能になった [1]。毛状の造形物はVRコントローラ [2] やテクスチャ表現 [3] のように、毛の長さによる触り心地の変化を活かして、身の回りにある触感の再現などに応用されている。ピンアレイの上下運動やモータの回転運動など、触覚提示手法と同様に、身の回りにある触感の再現のためにアクチュエータを用いる研究が行われている [4][5]。

本研究では、3Dプリンタで造形可能である毛構造について、先行研究 [5] で議論されている毛の動作についての拡張や、毛を使ったセンシングなどの実現を目指す。そのための準備段階として、先行研究で述べられたツールを使ったパラメータの再現性について調査を行った。さらに本稿で用いる毛構造のパラメータを選定するため、毛の長さ/密度などを調整することで、見た目や触り心地の変化を調査した。また、先行研究では熱溶解積層方式の3Dプリンタで一般的に用いられているPLA樹脂やABS樹脂を用いた毛構造しか作られていなかった。そのため、本研究では用いる材料に着目し、様々な材料を造形に用いることで、毛構造の特性にどのような変化が生じるか調査を行った。

毛構造の3Dプリントに用いる材料として、導電性/磁

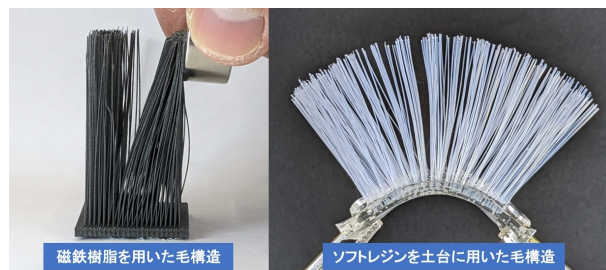


図1 毛構造の材料を工夫して可能になる動作

性を持つ特殊なフィラメントで造形を行い、毛にその特性が付与できるのか調査を行う。また、先行研究で造形される毛構造は、毛の部分と毛が生えている土台部分から構成されているため、土台部分に毛の部分とは異なる素材を適用することができる。本研究では、土台部分を柔軟に動かせるようにするため、土台部分を硬い樹脂から柔らかいソフトレジンに拡張した。様々な材料を用いることで毛構造が図1のような動作が可能になり、これらの毛構造を使った触覚提示の例について紹介する。

2. 関連研究

高橋らは熱溶解積層方式3Dプリンタを用いた毛構造の造形方法やその応用方法について提案している。具体的に、文献 [1] では熱溶解積層方式3Dプリンタを使用し、樹脂を引き伸ばすGcodeを3Dモデルに埋め込むことで、毛を3Dプリントする方法を提案している。また、文献 [5] では、[1] でGcodeを用いた毛の造形手法を、Gcodeを使わずに行えるようにした。さらに、3Dプリントした毛構造とサーボモータを組み合わせることで、毛先を垂直・水平移動や回転させることが可能な情報提示手法を提案している。Laputら [6] は、3Dプリンタの造形時に起こ

¹ 公立はこだて未来大学

² 明治大学

a) b1019171@fun.ac.jp

b) haruki@meiji.ac.jp

c) tsuka@fun.ac.jp

る糸引き現象を利用した毛の造形手法を提案している。文献 [1][5] の二つの壁を橋渡しするようにして造形する手法に対し、一つの壁から水平方向にフィラメントを引き伸ばす手法を用いている点で異なる。この造形手法を用いた毛構造は毛の先端部分にかけて細くなる特徴がある。

毛を用いた触覚の表現についての関連研究として、Lee ら [2] は、毛を用いて指先に触覚フィードバックを与える VR コントローラ型のデバイスを作製した。デバイスを用いて VR 上で仮想的な物体に接触することで、デバイスに内蔵されたモータが毛の長さや毛が指に触れる角度を制御し、柔らかい触感や粗い触感を指先で感じることができる。Degraen ら [3] は、VR で仮想的な物体の質感を知覚するためのテクスチャとして、3D プリンタで作られた毛構造のデザインに着目した。毛の長さのみが異なる五種類の毛構造を配置し、ユーザに着用させた HMD で布や金属などの視覚的な質感を毛構造の位置に重ね合わせて表示する。この状態でユーザに五種類それぞれの毛を仮想空間上で触れさせ、毛を使って再現したテクスチャと視覚的な質感を一致させることができるのか実験を行っている。

本研究では、先行研究 [5] の造形方法を活用して毛構造の造形を行う。造形する毛構造に対し、使うフィラメントを工夫することで、素材の性質を活用した情報提示手法を構築する。また、毛の土台部分などにセンサやアクチュエータを埋め込むことで、シンプルで滑らかに動作可能な情報提示手法を目指す。

3. 毛構造の造形パラメータ調査

3.1 毛構造の造形方法

毛構造の造形に関して、本研究で使用する 3D プリンタと材料で再現可能か確かめるため、先行研究 [5] で提案された手法を用いて造形することで、先行研究の再実装を行った。

造形環境としては、熱溶解積層方式 3D プリンタ (Creality Ender3, Ender3 v2) と PLA フィラメント (Voxelab PLA+) を用いた。左右に壁を作り、その間を往復して橋渡しするように樹脂を出力することで毛を造形していく (図 2)。これを繰り返すことで図 3 のように複数の毛が集まった毛構造を造形することができる。

毛構造の 3D モデルは Rhinoceros やそのプラグインである Grasshopper 等のプログラマブルな CAD 環境 (図 4) を用いて設計する。Grasshopper で毛の長さや毛同士の配置間隔、造形する毛の本数等のパラメータを UI 内のスライダーを動かすことで調整し、Rhinoceros 上で調整した毛構造の 3D モデルを反映させる。

3.2 パラメータ毎の毛構造の造形

本研究で用いるパラメータの選定のための造形実験を行った。パラメータについて、毛の長さや毛同士の配置間



図 2 橋渡しして樹脂を出力する様子



図 3 毛構造の造形の様子

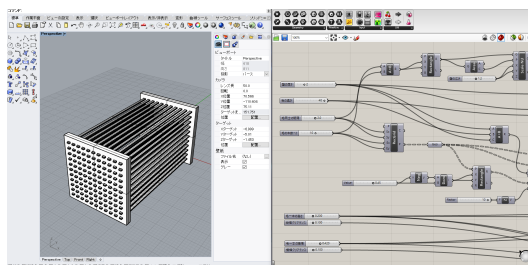


図 4 Rhinoceros と Grasshopper の UI

隔を変化させた。調査したパラメータの範囲を表 1 に記載する。先行研究 [5] で提案された毛構造 (毛の長さ: 40 mm, 毛同士の間隔: 2 mm) を基準としている。

表 1 でまとめたパラメータのうち、毛同士の間隔を基準の 2 mm で固定し、毛の長さを 20 mm, 80 mm にして造形を行った。出力した毛構造を図 5 に示す。この状態で上から指で触った際の触感に変化が生じた。毛が短い場合は硬い触り心地、長い場合は柔らかい触り心地が感じられた。

表 1 でまとめたパラメータのうち、毛の長さを基準の 40 mm で固定し、毛同士の間隔を 1 mm, 5 mm にして造形を行った結果を図 6 に示す。毛同士の間隔を変えることによって毛の長さを変えたときのように触感に変化が生じた。間隔が狭い (1 mm) 毛構造はブラシや毛筆に触れている際の、たくさんの毛を一度に触っているような触感を感じられた。間隔が広い (5 mm) 毛構造では、間隔が狭い毛構造と比較して毛の密度が小さくなるため、指先で触れると毛先が広がり、毛構造の内部に指を入れることができる。

表 1 造形パラメータの調査

	基準	パラメータを変更した範囲
毛の長さ	40 mm	20 mm - 80 mm
毛同士の間隔	2 mm	1 mm - 5 mm

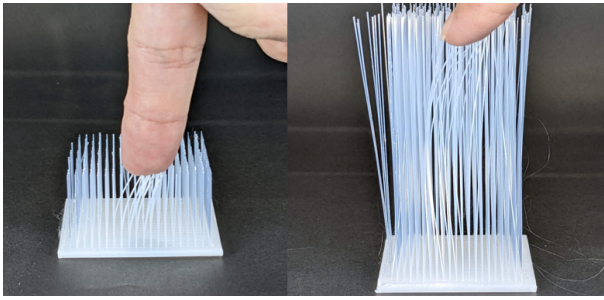


図 5 毛の長さを変更した毛構造
左が 20 mm, 右が 80 mm

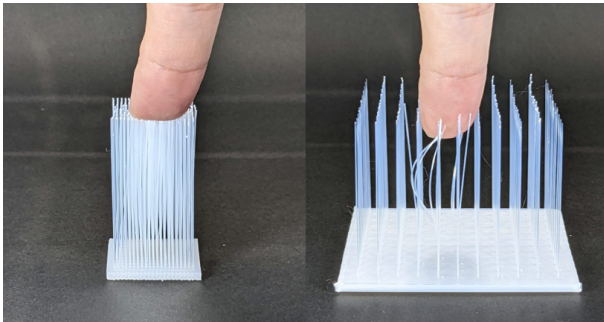


図 6 毛の配置間隔を変更した毛構造
左が 1 mm, 右が 5 mm

4. 異なる材料を用いた毛構造の特性変化

3D プリンタでは、さまざまな種類の材料（フィラメント）を使用して造形をすることができる。一般的には PLA 樹脂や ABS 樹脂を用いるが、造形する目的や用途に合わせて、耐衝撃性や耐熱性といった性質を持つ樹脂などを使い分ける。また、PLA 樹脂に粉末素材（フィラー）を混ぜ合わせたフィラメントを使用することで、素材の特性を造形物に持たせることができる。本研究では、導電性/磁性の 2 種類の特殊フィラメントを毛構造の造形材料に用いることで、毛構造の特性にどのような変化が生じるか調査を行った。また、毛構造の土台部分を柔軟に動かすために、土台部分を硬い樹脂から柔らかいソフトレジンへ拡張を行った。

4.1 導電性フィラメント

導電性フィラメントとは、樹脂に炭素系の粉末材料が混ぜこまれている樹脂フィラメントである。ここでは導電性フィラメント (Proto-pasta CDP) を材料として毛構造を造形した。導電性フィラメントを使うことで造形物に導電特性を付与することができる。そのため、このフィラメントを用いた造形によって、接触による静電容量の変化や、曲げることで抵抗値が変化する造形物を作ることができる。この性質を利用してセンサやスイッチなど電子回路パターンの作製用途として使われる。

本研究では、導電性フィラメントによる毛構造によって、

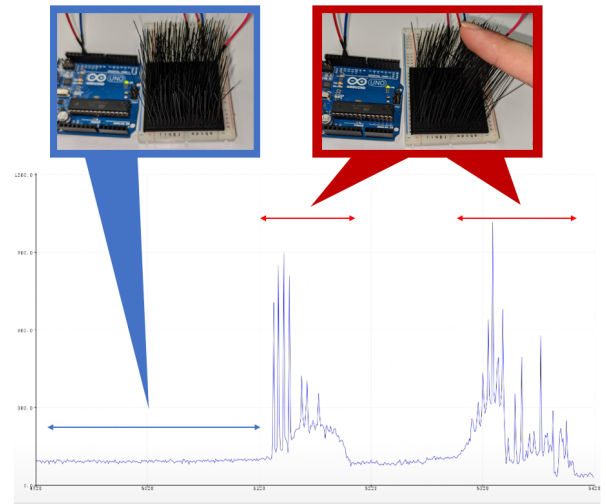


図 7 毛を撫でた時の静電容量の値

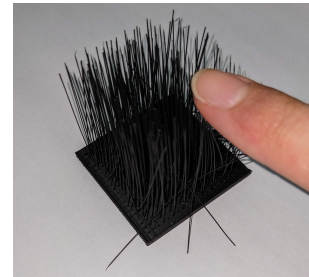


図 8 導電性フィラメントで造形後の毛構造

毛の接触を計測できることを期待して造形を行った。毛に導電性を付与し、静電容量の変化を確認することができれば、この毛構造を静電容量方式のタッチパネルの上に配置することで、毛を撫でた方向にタッチパネルのスクロールを行うなどの応用ができると考える。

前述した毛構造の造形方法と同様の手法を用いて導電性フィラメントを用いた造形に成功し、図 7 の結果より、毛を撫でることで静電容量が変化する様子が見られた。計測は Arduino Uno で CapacitiveSensor ライブラリを用いて行った。造形に成功し、毛を使った計測も可能だったが、造形後の毛を指で撫でた際に、毛が抜けてしまうことや折れやすいといった耐久性の問題が発生した (図 8)。これは、フィラメントに粉末材料を混ぜ込んだことで、PLA 樹脂よりも耐久性が低くなったことが原因だと考えられる。そのため、導電性フィラメントで造形した毛構造について、現状では造形後に毛を撫でる際は慎重に扱う必要がある。

4.2 磁鉄 PLA フィラメント

磁鉄 PLA フィラメントとは、PLA 樹脂に鉄粉末を混ぜた樹脂フィラメントである。ここでは磁鉄 PLA フィラメント (Proto-pasta MIPLA) を材料として毛構造を造形した。磁鉄 PLA フィラメント鉄粉末が混ぜこまれていることにより、造形物を金属のように扱うことができる。このフィラメントは造形物に強磁性を持たせることを目的とし

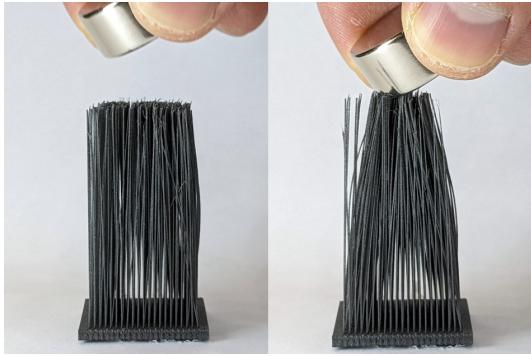


図 9 磁石に引き寄せられる毛構造

て作られているが、副次的な性質として、造形後の後処理により金属光沢や赤錆を造形物の表面に出すこともできる。

本研究では、磁力によって毛の動きを制御することを目的として、磁鉄 PLA フィラメントを用いて毛構造の造形を行った。強磁性を持つ毛構造によって、毛構造を手を持った状態から磁力によって毛を動作させることや、電磁石によって毛の動きを連続的に制御するなどが応用として考えられる。

造形に成功し、図 1 左や図 9 のように、毛の部分が磁石に引き寄せられる特性の変化が見られた。また、磁力の強さによって引き寄せられる毛の量が変わった。造形後の毛構造について、導電性フィラメントでの造形の場合とは異なり、耐久性に問題は発生しなかった。そのため、磁石を近づけても毛が抜けることなく扱うことができる。

4.3 毛構造のソフトレジンへの埋込

3D プリントした直後の毛構造では、毛が生える土台部分が樹脂製のため、毛の部分の動きに対して、毛が生えている土台部分は曲げることはできなかった。そのため、本研究では、毛が生える土台部分のみについても異なる素材を用いる。ここでは、毛構造の土台部分を柔軟に駆動させるための準備段階として、毛構造を 3D プリントした後に土台部分を樹脂製からソフトレジンへの拡張を行った。

柔軟なレジンに毛を埋め込む手順を図 10 の順番に沿って説明する。まず、3D プリントした直後の毛構造の片方の壁と毛を切り離し、UV ライトで硬化するソフトレジン液を型に流しておく。その後、毛の先端をレジン液に埋める。この状態で UV 照射機を用いて UV ライトを照射し、レジン液を硬化させる。このようにして、硬化したレジンの壁と樹脂の壁で挟まれた毛構造を作ることができる。その後、樹脂製の壁と毛を切り離すと柔軟な土台の毛構造を作ることができる。

ソフトレジンへの埋め込んだ毛構造によって、図 1 右のように、土台部分を曲げることで毛が開くような動きができるようになる。また、ソフトレジンへの埋め込みは、毛構造を 3D プリントした後に行うことができる。そのため、前述した材料の工夫で導電性／磁性を持つ毛構造の状態か

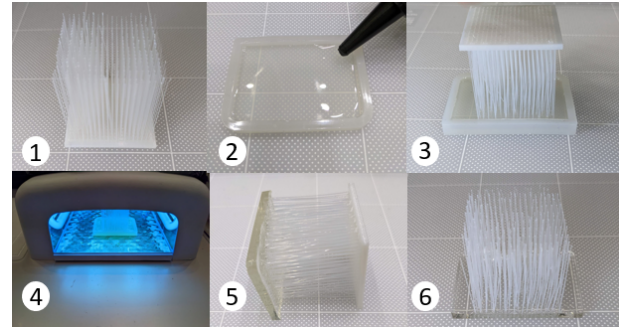


図 10 レジンに毛を埋め込む方法

ら、さらに土台部分のみをソフトレジンへ拡張することができる。また、UV ライトでレジン硬化させる前に、毛と一緒に電子部品を埋め込むことができれば、土台部分を曲げることで可能になった毛の動きを電子的に制御できると考えられる。

5. 材料を工夫した毛構造を用いた触覚提示

5.1 磁性を持つ毛を筆にした例

磁鉄 PLA フィラメントで造形した毛構造を使った作例について紹介する。毛構造をアタッチメントのように取り付けることができる棒状の造形物と磁石を嵌め込むことができるボードを作製した(図 11)。図 6 の例のように、毛構造のパラメータを組み合わせることでブラシを作ることができる。これを棒状の造形物に取り付けることで筆のような形状にすることができる。筆を手を持ち、磁石が一定間隔で配置されたボードの上を筆でなぞることで(図 12)、ボードの磁石に筆が引き寄せられる。そのため、筆で撫でているときに部分的に抵抗感がある触覚を提示することができる。この抵抗感を感じる仕組みを利用して、例えば、磁石を嵌め込むボードの上に文字の書き方を練習するための見本用紙を敷き、見本の文字の書き始めや書き終える位置にあらかじめ磁石を埋めておく。そうすることで、筆が引き寄せられる感覚や筆を動かそうとするときの磁力による抵抗感などを手で感じながら文字を書く練習などができるようになる。

5.2 ソフトレジンに埋め込んだ磁性フィラメント

毛構造をソフトレジンに埋込ができるようになったことで、毛構造の土台部分を柔軟に扱うことができるように

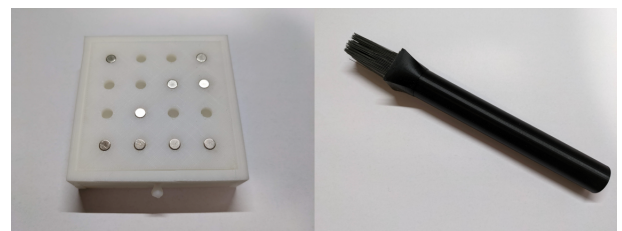


図 11 磁石ボードと磁性の筆

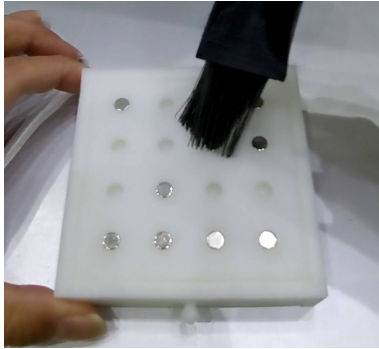


図 12 筆で磁石ボード上をなぞる様子



図 13 掌への毛構造の貼り付け

なった。そのため、毛構造を貼り付けられる場所は平面以外にも手足などの湾曲した部分にも可能になった。図 13 では、毛の部分が磁性フィラメント、土台部分がソフトレジン製の毛構造を掌に両面テープで貼り付けている。このようにすることで、磁石を近づけた際に、磁力による引き付けられる力を手の感覚で感じることができる。磁石を動かすことで、磁石の場所や磁力の変化も感じることができた。

6. 今後の展望

本稿では、毛構造の造形に用いる材料の工夫や毛の土台部分をソフトレジンに拡張した。さらに、これらを用いた作例について提案を行った。今後の展望として、毛をソフトレジンへ埋め込んだ毛構造に電子部品を組みわせることで毛構造の電子的な制御を行いたい。ソフトレジンの内部に曲げセンサを埋め込むことで土台の変形を検出することや、バイオメタル（線状の形状記憶合金）を埋め込むことで土台を湾曲させて毛を駆動させるなど制御ができると考える。

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] 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. In Proceeding of

- WISS2017. 日本ソフトウェア科学会, 2017.
- [2] Chi-Jung Lee, Hsin-Ruey Tsai, and Bing-Yu Chen. Hair-touch: Providing stiffness, roughness and surface height differences using reconfigurable brush hairs on a vr controller. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2021.
- [3] Donald Degraen, André Zenner, and Antonio Krüger. Enhancing texture perception in virtual reality using 3d-printed hair structures. In *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 1–12, 2019.
- [4] 高見太基, 齋藤大雅, 亀岡嵩幸, 梶本裕之. スライムにピンアレイを刺突することによる表面凹凸の変化が平滑感覚に与える影響. In Proceeding of 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集. 特定非営利活動法人 日本バーチャルリアリティ学会, 2021.
- [5] 高橋治輝. 3D プリントした毛を用いた触覚ディスプレイの提案. In Proceeding of WISS2021 予稿集. 日本ソフトウェア科学会, 2021.
- [6] Gierad Laput, Xiang'Anthony' Chen, and Chris Harrison. 3d printed hair: Fused deposition modeling of soft strands, fibers, and bristles. In *Proceedings of the 28th annual ACM symposium on user interface software & technology*, pp. 593–597, 2015.