

導電性・強磁性・および土台の可撓性を持つ毛構造の造形手法と評価

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

受付日 2024年5月19日, 採録日 2024年11月1日

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）の拡張について提案する。先行研究で提案されていた毛構造の造形手法を活用し、導電性/強磁性などを備えるフィラメントを造形に用いる方式や、柔軟に変形させることができるソフトレジンに毛を埋め込む方式を提案する。提案した方式で試作した毛構造を用いて、タッチ操作を検出可能な毛状インタフェースや磁石に毛先が吸い寄せられるブラシ、曲げセンサを埋め込んだ毛構造といった、インタラクション研究に活用可能な制作例を示す。材料や造形パラメータの変化させた毛の触感の印象を調査するユーザテストを実施し、調査結果を用いて柔らかい触感や軽い触感といった感性指標から毛の長さや間隔を調整する設計支援システムを実装した。

キーワード: デジタルファブリケーション, 3D プリント, 触覚提示, 毛構造

Conductive, Ferromagnetic and Bendable 3D Printed Hair for Designing Interactive Objects

KOSEI KAMATA^{1,a)} HARUKI TAKAHASHI^{2,b)} KOJI TSUKADA^{1,c)}

Received: May 19, 2024, Accepted: November 1, 2024

Abstract: In this study, we propose an extension of fine hairs (hair structure) that can be fabricated with an inexpensive thermal-melting 3D printer. Utilizing the method of hair structure modeling proposed in our previous research, we propose a method of using conductive/ferromagnetic filaments for modeling and a method of embedding hairs in a soft resin that can be flexibly deformed. Using the hair structure prototyped with the proposed methods, we show examples of production that can be used for interaction research, such as a hair-like interface that can detect touch operations, a brush whose hairs are attracted to magnet, and a hair structure with a bending sensor embedded in soft base. We conducted a user test to investigate the tactile impression of hairs with different materials and modeling parameters, and implemented a design support system using the survey results to enable adjustment of hair length and intervals based on feeling indexes such as soft and light tactile sensations.

Keywords: digital fabrication, 3D printing, tactile presentation, hair structure

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プリンタで数ミリメートル単位の細かい形状や複雑な構造の立体物を造形可能となり、直径1mm以下の細長い毛のような構造（毛構造）を造形する手法が提案されている[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、毛の触感をデバイスで変化させること

¹ 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

² 立命館大学
Ritumeikan University, Ibaraki, Osaka 567-8570, Japan

a) g2123017@fun.ac.jp

b) haruki@fc.ritsumeikan.ac.jp

c) tsuka@mobiqutious.com

によって、実世界の触感の再現などに応用されている。また、触覚提示のための構造と上下運動や回転運動が可能なアクチュエータとを組み合わせて、触覚ディスプレイとして扱う研究も行われている [4]。

一方、先行研究で提案された毛構造にはまだ拡張の余地が残されている。まず、毛を造形する際の材料に関して、これまでの手法では主に PLA 樹脂が用いられており、フィラメントの種類について十分検証されていない。また、毛構造の毛の部分はプラスチック製の硬い土台に固定されており、この土台部分を柔軟に折り曲げて活用するような事例はない。さらに、こうした毛構造がもたらす触感の傾向を理解するためのユーザテストも行われていない。

本研究では、こうした造形材料や土台部分の拡張を通して、細かい毛の集合体に、入力/出力機能を付与する手法について、それぞれ具体的な制作例を示しながら次の3つの造形手法を提案する。まず1つ目は、導電性を付与した毛による入力機能の付与であり、2つ目は強磁性を付与した毛による出力機能の付与である。さらに、ソフトレジンへの埋め込みによって、センサ/アクチュエータを毛構造の一部に取り付けることができるようになる。そのための手法として、導電性/強磁性を持つフィラメントを造形に用いる方式や、ソフトレジンに毛構造を埋め込む方式を提案・試作する。これらの方式を用いることで、毛構造をセンサやアクチュエータとして扱い、静電容量/磁力/曲げる力などを活用したインタラクティブな触覚ディスプレイを構築できると考える。また、材料や造形パラメータを変化させた試作品を用いて触感の印象に関するユーザテストを行い、材料や造形パラメータの変化による触感の関係性を明らかにした。さらに、得られた調査結果を用いて設計支援システムを実装した。本論文は WISS2023 で登壇発表 [5] を行った内容に加筆したものである。

2. 関連研究

2.1 毛の造形手法

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 G-code を直接記述することで、毛を 3D プリントする手法を提案している。文献 [4] では、G-code を使わずにスライサソフトウェアのみを用いて行えるようにした。さらに、毛構造とサーボモータを組み合わせることで、毛先を移動・回転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], [4] は2つの壁を橋渡しするようにして造形するが、この手法では1つの壁から水平方向にフィラメントを引き伸ばしている。その影響として、毛の先端部分にかけて細くなる特徴がある。Ou ら [7] は、光造形方式の 3D プリンタを用いて、細

かい毛を表面テクスチャとして持ち、毛が生える傾きなどを調整できる毛構造を作成した。応用例として、毛の上に置いた物体の動きを制御できるアクチュエータを提案している。本研究では、先行研究 [4] 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、導電性/強磁性などの多様なフィラメントを利用することで、素材の性質を活用したインタラクティブな手法を構築する。

2.2 毛構造を使った触覚提示・センシング

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 コントローラを作成した。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角度を制御し、柔らかい触感や粗い触感を指先に伝えることができる。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、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5種類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できるのか実験を行っている。Umezuru ら [8] は、形状記憶合金をフレキシブルチューブで覆い、光センサーを組み込むことで、光量によって曲がり具合が変わる直径 3mm の毛を作成した。この毛を複数本合わせて LCD 上に置くことで、複数の毛を LCD の画面映像の光によって制御することなどができる。中嶋ら [9] は、半透明のプラスチック光ファイバーと赤外線による接触検出技術を用いて、毛状のマルチタッチディスプレイを提案している。光ファイバーが配置されている隙間から赤外線ライトを照射し、接触による赤外線の反射によってタッチ部分を検出する。プロジェクターを使い、光ファイバーの束を発光させることで、視覚的なフィードバックを行う。遠藤ら [10] は、3D プリンタを使用して毛と毛根を造形し、食用のアガーを固めた弾性体に毛を埋め込むことによって、生物の毛と皮膚を模したものを作成した。毛根の下部からカメラで撮影し、弾性体による光弾性の変化を観測することで、微細な毛のタッチ検出を行うことができる。本研究では、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、単純な構造で静電容量/磁力/曲げる力などを活用したインタラクティブな手法の構築を目指す。

3. 提案

本研究では、毛構造をインタラクティブな研究に活用するために、導電性/強磁性を付与する方式、ソフトレジンに植毛する方式を提案する。そのために、4章では、本研究で使用する造形環境や印刷設定について整理し、5章で各方式の実装について述べる。導電性/強磁性を付与する方式では、造形材料を変更し本研究で示す印刷設定を用いて

作成する。導電性の毛を利用し、静電容量による接触検知を行うことで、毛へのタッチ/スワイプ動作を用いた入力機能として活用することができる。さらに、強磁性の毛を手を持つことで、磁力による触覚フィードバックが可能になる。また、ソフトレジンに植毛する方式によって土台に可撓性を付与し、土台を曲げて毛を大きく動かすような動作が可能になる。また、毛構造を湾曲した部分に貼り付けることもできる。さらに、この方式は毛構造を3Dプリントした後に行うものであるため、導電性/強磁性の毛構造と組み合わせて拡張することや、センサ/アクチュエータの埋め込むことで柔軟な機能拡張ができる。こうした応用例を、6章の制作例で具体的に紹介する。7章では、本研究で提案した手法をより良く理解するために、毛構造の印象評価と設計支援システムを紹介する。

4. 造形環境

毛構造の造形に関して、先行研究 [4] で提案された手法を用いて実装を行った。造形環境として、熱溶解積層方式3Dプリンタ (Crealitiy Ender3, Ender3 v2) と PLA フィラメント (Voxelab PLA+) を用いた。ノズルは 0.4 mm 径のものを使用した。左右に壁を作り (図 1 ①)、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 1 ②)。これを繰り返して複数の毛が集まった毛構造を造形することができる (図 1 ③)。

毛構造の3DモデルはRhinoCerosやそのプラグインであるGrasshopperなどのプログラマブルなCAD環境 (図1下部) を用いて設計する。Grasshopperで毛の長さや毛同士の配置間隔、毛の本数などの造形パラメータをUI内のスライダ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。以降の章では、このシステムを用いて設計した造形データを用いて造形実験を実施する。また、先行研究で採用されていた毛構造 (毛の長さ: 40 mm, 毛の配置間隔: 2 mm) を本研究の中での標準的なものとして扱い、制作例やユーザスタディに合わせて長さや配置間隔の調整を行う。

毛の長さは、今回の造形環境では、最大 80 mm ~ 最小 20 mm としている。この最大値とした理由として、長い毛を造形したときに生じる弛みがある。造形時に2つの壁を橋渡しする距離が長くなると、橋 (毛) が徐々に弛んでしまう。先行研究では、橋渡し距離を 50 mm で造形した場合は 1.7 mm ほど弛んでしまうことが示されている [11]。毛構造は多少弛んでも造形自体は可能だが、度が過ぎると最終的な見た目が歪んでしまう。そこで、予備的な調査を経て、最大 80 mm を上限とした。また、最小の長さは先行研究で使用されていた毛構造の長さの半分の 20 mm とした。

毛の間隔は、今回の造形環境では、最大 5 mm ~ 最小 1 mm としている。この理由として、間隔を 1 mm 以下にしていると、毛同士が造形直後の熱で溶けてつながってしまう

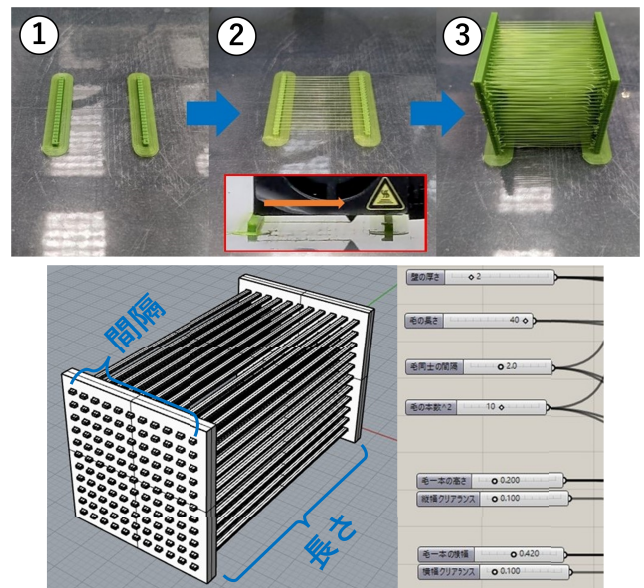


図 1 毛構造の造形の様子および設計システム

Fig. 1 Modeling process of hair structure and design system.

ためである。また、毛の間隔は制限なく広げることができるが、触っている質感を得るためには毛がある程度まとまっている必要がある。そのため、本研究では調整可能な間隔の最大値を 5 mm と設定した。

5. 実装

3Dプリンタでは、さまざまな種類の材料 (フィラメント) を使用して造形する。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材料が存在する。本研究では、機能性を持つ材料として、導電性材料/強磁性材料を使うことで、入力/出力機能を持つ毛構造の試作を行った。さらに、ソフトレジンを用いて毛構造の土台部分に可撓性を付与する方式を試行錯誤的に探索し、毛の動きの可能性を広げることや電子部品の取り付けをより単純な構造で行えるようにした。

5.1 導電性フィラメント

導電性フィラメントとは、PLA 樹脂に炭素系の粉末材料を混ぜた樹脂フィラメントである。ここでは導電性 PLA フィラメント (Proto-pasta CDP)*1 を使用して毛構造の造形を行った。導電性フィラメントを使うことで造形物に導電特性が付与される。そのため、このフィラメントはインタラクティブなオブジェクトの制作や電子回路用の部品の作成によく使用されている [12], [13]。導電性フィラメントで造形した立体物は静電容量の変化によって接触の検知

*1 <https://www.proto-pasta.com/collections/all/products/conductive-pla>

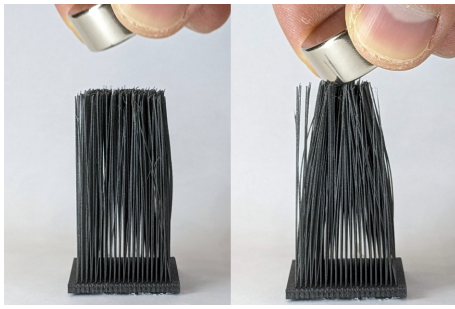


図 2 磁石に引き寄せられる毛構造

Fig. 2 Hair structure attracted to permanent magnet.

や、曲げセンサのように立体物を曲げたときの状態を抵抗値から計測ができるようになる。

本研究では、導電性フィラメントを使って繊細な毛構造の 3D プリントを試みた。造形後の毛構造はやや耐久性が下がってしまうが、毛の長さ、密度、太さなどの造形パラメータを指定してモデルを造形可能であることが分かった。

5.2 強磁性フィラメント

強磁性フィラメントとは、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)*2 を材料として毛構造を造形した。鉄粉末が混ぜこまれていることにより、造形物に金属の特性が付与される。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て使用されているが、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目的でもこの素材が使用されている。

本研究では、強磁性フィラメントを使って繊細な毛構造の 3D プリントを試みた。本研究で用いた環境では、スライサの設定でノズル温度を推奨である 200°C よりも 20°C 高く設定し、フィラメントの押し出し量を 110% にすることで安定して造形できることが分かった。

強磁性フィラメントを使った毛の 3D プリントでも、毛の長さ、密度、太さなどの造形パラメータを調整してモデルを造形可能であることが分かった。造形した毛構造は、図 2 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。さらに、これまでの PLA 樹脂製の毛構造よりも丈夫であり、強磁性の毛構造を手を持った状態で軽い磁石を持ち上げることが可能である。

5.3 毛構造のソフトレジンへの埋め込み

3D プリントした直後の毛構造の両端は、安定して造形するために 2 つの壁によって毛の両端が固定されている (図 1 ③)。3D プリント後は、カッターナイフを用いて片側を切り離すことにより毛構造を完成させる。そのため、毛構造の土台となっている部分は硬い板状になっており、

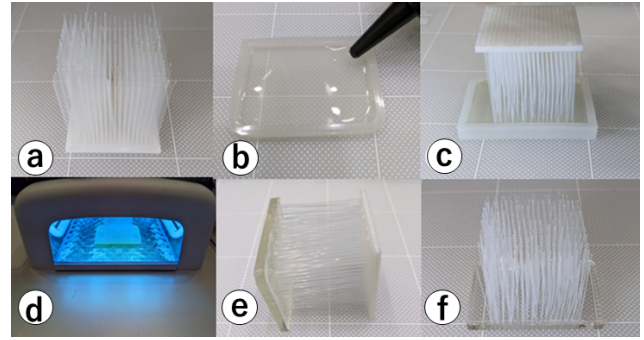


図 3 レジンに毛を植毛する方法

Fig. 3 Process of planting hair into soft resin.

曲げることは不可能である。土台部分をより柔軟にして曲げることが可能になれば、毛の動きの可能性をさらに広げたり、曲面に貼り付けたりすることができるだろう。ここでは、毛構造の 3D プリント後に、土台部分を異なる素材に置き換える手法を紹介する。毛構造を柔軟に動作させることを可能にするため、土台にはレジンクラフトなどで使用されるソフトレジンを使用し、柔軟な土台への植毛を行う。

5.3.1 ソフトレジンへの埋め込み手順

ソフトレジンに毛を埋め込む手順を図 3 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 (図 3 a)、UV ライトで硬化するソフトレジンを型に流しておく (図 3 b)。その後、毛の先端をレジン液に埋める (図 3 c)。この状態で UV 照射機を用いて UV ライトを照射し、レジンを硬化させる (図 3 d)。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 (図 3 e)。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 (図 3 f)。

5.3.2 シリコンモールドの作成

ソフトレジンへの毛の埋め込みには市販のシリコンモールドを使用できるが、ソフトレジンが硬化する前の段階 (図 3 c) では毛の接地が不安定であり、UV 照射機に入れるときに、レジンに浸けた毛の先端が動いたり、毛構造自体が倒れたりしやすい。また、市販のシリコンモールドはサイズが限られているため、ソフトレジン土台の毛構造は目的に合わせたサイズで制作することが難しい。そこで、これらの問題の改善を目的としたシリコンモールドを作成する。図 3 の制作過程において、図 3 c の部分で使用されていた市販のシリコンモールドを新しく作成するシリコンモールドに置き換えることで、より安定した埋め込みが行えるようになる。

作成手順を図 4 a, b, c に示す。ソフトレジンを流し込むスペースとなる部分は、あらかじめ 3D プリントを用いて造形する。ここでは、シリコンモールドに毛の先端が入り込む穴を設けるために、埋め込む毛の本数に合わせた窪

*2 <https://www.proto-pasta.com/collections/all/products/magnetic-iron-pla>

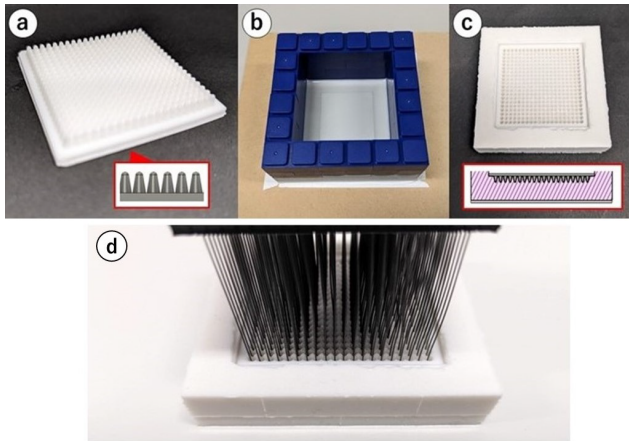


図 4 植毛に適したシリコンモールドの作成手順 (a~c) と植毛の様子 (d)
Fig. 4 Forming method of a silicone mold suitable for hair planting (a-c). Appearance of planting hair structure (d).

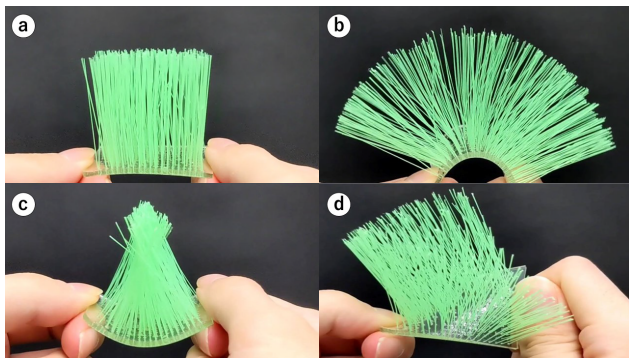


図 5 土台を曲げたときの動作
Fig. 5 Hair movement by bending the base.

みのある立体物を造形する (図 4a)。このような形状で型をとることによって、埋め込む毛構造のサイズに合わせたシリコンモールドが作成可能である。この立体物 (図 4a) をシリコン作成用の枠に収め、シリコン液を枠に流し込み、硬化させることでシリコンモールドを作成する (図 4b)。この状態で1日経過させ、固まったシリコンから枠と立体物を取り外すことで、図 4c のようなシリコンモールドが作成できる。これに毛構造を設置すると、図 4d のように、毛の先端がシリコンモールドに作られた細かな穴に入り込み、毛が均等に広がり、倒れにくい状態にできる。この改善により、図 3 の工程をより安定して行うことが可能になる。ソフトレジンへ植毛した毛構造によって、土台部分を曲げることで毛が開く/閉じる動きや土台をねじることによる動きができるようになる (図 5)。

6. 制作例

6.1 導電性の毛構造を使った接触・接触方向検知

導電性を付与した毛構造によって、毛による質感を感じながらアプリケーションを操作するなどのインタラクシ

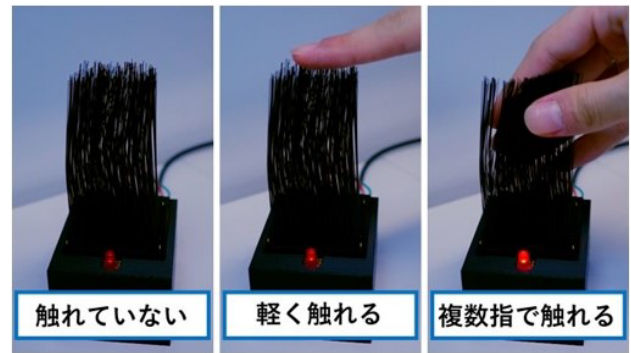


図 6 毛への接触による LED の点灯および静電容量の変化
Fig. 6 The change of LED and capacitance by touching conductive hair.

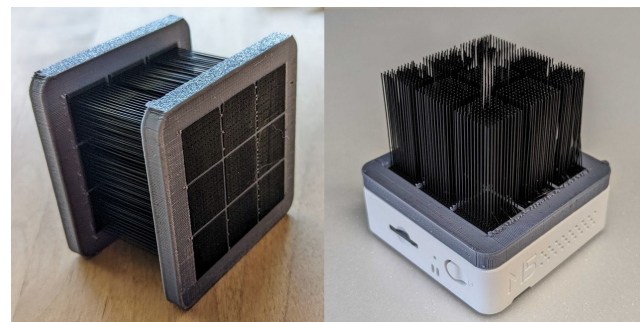


図 7 マトリクス状に配置した毛構造を M5stack に取り付け
Fig. 7 Matrix-type hair structure mounted on M5stack.

ンに活用できると考える。図 6 は、こうした応用を目指して制作した例である。導電性の毛に手指が接触することで LED が点灯する例である。静電容量の測定には Arduino の CapacitiveSensor ライブラリを用いており、手が接触することによる静電容量の変化を検出している。この制作例では、3つの状態 (触れていない状態、指が触れている状態、指が多く触れている状態) を検出することができる。

また、図 7 左のように、導電性を持つ毛と非導電性のフレームをマトリクス状に配置したもの设计了。導電性の毛のモデルは設計支援システムで出力し、出力したモデルを Rhinoceros でさらに編集することで形状を設計した。これをマルチカラープリンタで 3D プリントし、導電性の毛構造を非導電性のフレームで 9 個 (3×3) 分割することで、電気的につながらないようにしている。このようにすることで、9カ所の接点でそれぞれ接触検知が可能になる。図 7 右のように静電容量タッチパッド (M5stack) に置く

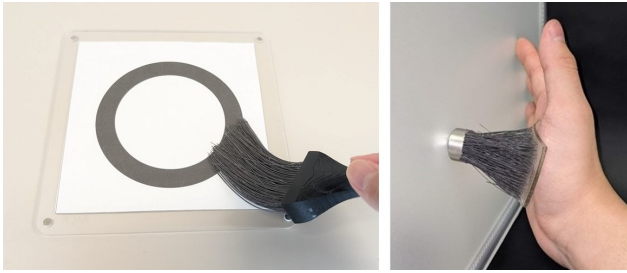


図 8 強磁性フィラメントを使用した制作例

Fig. 8 Prototype examples using ferromagnetic filaments.

ことで、指が触れた位置を記録することができるようになり、指が移動した方向を検知することが可能になる。マトリクス状の毛構造とタッチパッドの固定には専用のフレームを設計して固定した。簡易的な検証として、9カ所を10回ずつタップしたところ、誤検出は5回(5%)であった。今後は、詳細な性能調査も進めていきたい。

6.2 強磁性を持つ毛を使った触覚フィードバック

強磁性を付与した毛構造によって、磁力を組み合わせた触覚フィードバックを起こすことが可能になった。その作例として、強磁性の筆と永久磁石を使った制作例を紹介する。まず、平筆のような形状の毛構造を棒状の立体物に取り付けた。さらに磁石を埋め込むことができるボードをアクリル板とレーザーカッターで作成した。平筆を手を持ち、ボードの上を筆でなぞることでボードの磁石に毛先が引き寄せられる(図8左)。用紙の下には円状に磁石が配置されているため、平筆でボード上の記号をなぞる際に部分的な抵抗感がある触覚を表現することができる。この抵抗感を感じる仕組みを利用して、埋め込む磁石の位置や磁力の大きさを制御することによって、特定の文字やパターンによる触覚をユーザに提示するアプリケーションの設計が可能であると考ええる。

6.3 ソフトレジンに埋め込んだ強磁性の毛

毛構造をソフトレジンに埋め込むことで、毛構造の土台部分を柔軟に扱うことができるようになった。そのため、毛構造を手足などの湾曲した部分にも貼り付けることが可能になった。図8右では、毛の部分が強磁性フィラメント、土台部分がソフトレジンで毛構造を手のひら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触覚を毛が集まる様子だけでなく手のひらの感覚で感じることができる。磁石を動かすことで、磁石の位置にともなう磁力の変化も感じることができた。

6.4 柔らかい土台による電子部品の埋め込み

また、UVライトでレジン硬化させる前の段階で、図9のように毛と一緒に電子部品を埋め込むことで、毛構造の

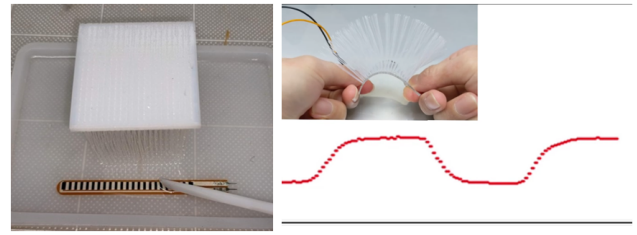


図 9 電子部品の埋め込みと曲げセンサを用いた計測例

Fig. 9 Example of measurement using embedded bending sensor.

柔軟な土台部分利用したセンシングやアクチュエーションが可能となる。試作として埋め込んだ曲げセンサ(SEN-10264)のような、薄く柔軟性のある電子部品が埋め込みに適していると考ええる。

7. 印象評価と設計支援システム

7.1 毛構造の触覚の印象評価

7.1.1 目的

造形パラメータが異なる毛を被験者に実際に触らせて、それぞれの毛の触覚について印象評価を行う。感性指標と造形パラメータを結び付けることで、人間にとって分かりやすい設計支援システムを作れる可能性があると考ええる。そのため、人間が毛構造に触れた際の主観的な印象を取得するために、物理量による触覚評価ではなく、感性指標を用いた評価を実施した。また、本論文で提案する導電性/強磁性の毛構造を使った制作の参考にするため、造形パラメータは変更せずに造形材料だけを変えた場合の触覚への影響も調査する。

7.1.2 手法

事前準備として、5種類の「造形パラメータを変更して造形した毛構造」と「導電性/強磁性フィラメントを造形材料とした毛構造」を用意した。これらの造形パラメータと材料についてまとめたものを表1に示す。毛構造自体が独特の触覚を持つことを考慮し、本研究の中の標準的な造形パラメータである毛構造Aに触れた印象をベースラインとして、毛構造B-Gに触れた印象を回答させた。

被験者は、20~25歳の男性12名、女性2名の合計14名であり、うち2名は本実験に関する知識があった。まず、被験者には、実験で使用する毛構造が3Dプリンタで作成したものであることを伝え、表1の毛構造Aを提示し、形状と触覚を確認させた。その後、実験者は毛構造B-Gの中から1つを順序効果を考慮して被験者に提示し、毛構造Aと触覚を比較しながら評価を行わせた。なお、毛構造B-Gの形状は被験者からは見えないように配慮した。実験の様子と実験で使用された毛構造を図10に示す。実験では、被験者に片手で毛構造の毛先部分に指を押し付けるようにして触れさせながら、利き手で紙媒体のアンケートに回答してもらった。この手順を毛構造B-Gに対して繰り返し実

表 1 実験に使用した毛構造の詳細

Table 1 The detail of hair structures used in the experiment.

	毛の長さ	毛の間隔	造形材料
毛構造 A	40 mm	2 mm	PLA
毛構造 B	20 mm	2 mm	PLA
毛構造 C	80 mm	2 mm	PLA
毛構造 D	40 mm	1 mm	PLA
毛構造 E	40 mm	5 mm	PLA
毛構造 F	40 mm	2 mm	導電性 PLA
毛構造 G	40 mm	2 mm	磁鉄 PLA

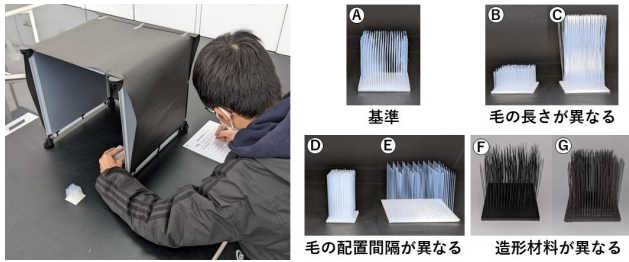


図 10 実験の様子と使用された毛構造

Fig. 10 The setting and hair structures used in the experiment.

施した。アンケートに使用した形容詞対は SD 法 [14] の側面から、なめらか～粗い、やわらかい～かたい、軽い～重い、力強い～弱弱しいの 4 つの形容詞対は物理的な触感を評価するために選出した。親しみにくい～親しみやすい、悪い～良いの形容詞対は毛構造の「心地よさ」も調査し、制作の参考にしたいと考えたため選出した。形容詞対それぞれについてそれぞれ 7 段階で回答させた (図 11 参照)。

7.1.3 結果

アンケートの結果の平均値と標準偏差について、毛の長さが異なる場合の結果を図 11、毛の配置間隔が異なる場合の結果を図 12、毛の造形材料が異なる場合の結果を図 13 にそれぞれ示す。

図 11 より、「-3：やわらかい～+3：かたい」の質問については、長さが 20 mm の毛構造 (B) は平均 1.93 (標準偏差 0.92) となり、長さが 80 mm の毛構造 (C) は平均 -2.14 (標準偏差 0.66) という結果が得られた。また、「-3：なめらか～+3：粗い」, 「-3：軽い～+3：重い」, 「-3：弱弱しい～+3：力強い」についても差が見られた。

図 12 より、「-3：軽い～+3：重い」の質問については、間隔が 1 mm の毛構造 (D) は平均 0.21 (標準偏差 1.31) となり、間隔が 5 mm の毛構造 (E) は平均 -2.21 (標準偏差 0.70) という結果が得られた。また、「-3：弱弱しい～+3：力強い」の質問については、間隔が 1 mm の毛構造 (D) は平均 1.14 (標準偏差 1.17) となり、毛の配置間隔が広い毛構造 (E) は平均 -2.29 (標準偏差 0.83) という結果が得られた。ほかにも、「-3：なめらか～+3：粗い」, 「-3：親しみにくい～+3：親しみやすい」, 「-3：悪い～

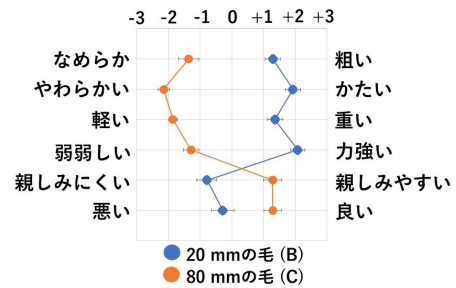


図 11 毛の長さが異なる場合 (A-B, A-C) の平均と標準偏差
Fig. 11 The result of different lengths of hairs (A-B, A-C).

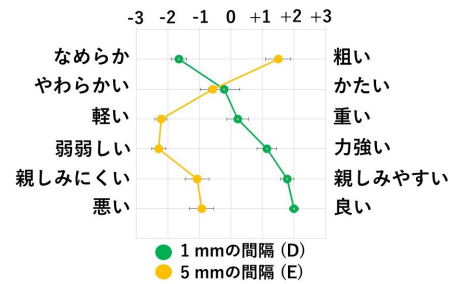


図 12 毛の間隔が異なる場合 (A-D, A-E) の平均と標準偏差
Fig. 12 The result of different interval of hairs (A-D, A-E).

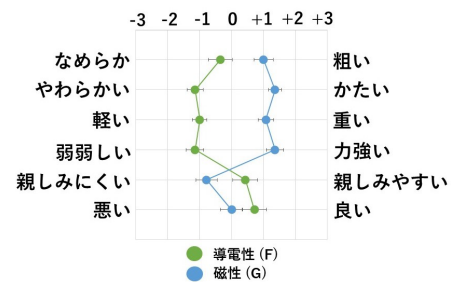


図 13 毛の素材が異なる場合 (A-F, A-G) の平均と標準偏差
Fig. 13 The result of different materials of hairs (A-F, A-G).

+3：良い」についても差が見られた。しかし、「-3：やわらかい～+3：かたい」の質問についてのみ、差はほとんど見られなかった。

図 13 より、造形に使用する材料を変えた毛構造では、印象についてあまり大きな変化は見られなかった。材料の特性の違いから、「なめらか～粗い」「やわらかい～かたい」などの項目で若干の分散は見られるが、毛の長さや間隔を変更した場合と比較すると、印象の差は小さい。

7.1.4 考察

毛の長さに関する実験結果から、毛が長いほどやわらかさを感じ、短いほど硬く感じる傾向を確認できた。また、やわらかさだけでなく、なめらかさなどの触感の印象を変えたい場合も、毛の長さの変更が有用であると考えられる。毛の配置間隔を狭め、密度を高めることによって、力強い印象を受けることが確認できた。毛の配置間隔を広くすることで、毛の密度が低くなる。これによって、撫でたときに指に触れる毛の本数が減少し、軽くまたは弱弱しくを感

じる傾向を確認できた。

一方、毛の長さを変えた場合とは異なり、毛の配置間隔を変えた場合では、かたさの印象について差がでないことが分かる。

造形パラメータの印象差は±2程度が触感に差が感じられる目安としているのに対し、材料による印象差は±1程度であるため、センシング/アクチュエーションに応用しても、印象差をあまり崩すことなく使用することができる可能性があると考えられる。

評価実験の結果は、今後、毛構造を用いたアプリケーションの実装に活用できると考える。たとえば、毛を撫でてリラックスするためのデバイスを作りたいユーザには、やわらかい/なめらかな触感を重視して、「毛を長くする/毛の密度を高くする」などの設定を推奨できる。また、毛構造の触感をつかって情報提示を行うようなアプリケーションを作る際に印象評価の結果を指標とすることで、実現したい触感を追求することができる。

また、変更した毛の長さは3通り、間隔は3通り、素材は2通りであるため、潜在的には8種類の組合せが存在するが、今回は基準となる毛構造と触り比べた印象評価を行うため、最小限の組合せのみを選択した。実験結果は、毛の長さ/間隔/造形材料の各観点からの印象の比較にとどまるため、最低限の条件は調査されていると考えるが、今後は複数の組合せの検証も必要である。

7.2 印象評価を元にした設計支援システムの設計

毛構造の造形パラメータや材料の変化による印象評価の結果から、毛の長さや配置間隔を調整することで、造形される毛の印象が変化することが分かった。しかし、この手法を活用するユーザが持っているのは、ある特定の印象の毛を造形したいという要求であり、具体的な毛の造形パラメータや3Dモデルの設計方法などについては十分な知識を持ち合わせていない。そこで、毛構造のモデリングを簡単に行えるようにするための設計支援システムを作成した(図14)。設計支援システムでは、毛構造の土台部分の形状や大きさなどの基本的な設計パラメータに加えて、毛構造の造形パラメータと感性指標とを相互に連動させながら調整することができる(図15)。

7.2.1 感性指標および造形パラメータ

システムを用いて設計可能な感性指標として、触感の「柔らかさ」と「重さ」を採用した。これらの指標は、評価実験の結果(図11, 図12)で、印象の差が特に大きい項目であったためである。システム上では、触感をイメージしやすい形容詞対として「かたい~柔らかい」、「重い~軽い」とし、実験と同様に7段階で調整可能とする。造形パラメータについても実験と同様に、「毛の長さ」と「毛の配置間隔」を採用した。これらのパラメータの範囲は評価実験で使用した試作品のパラメータの変更範囲までとした。

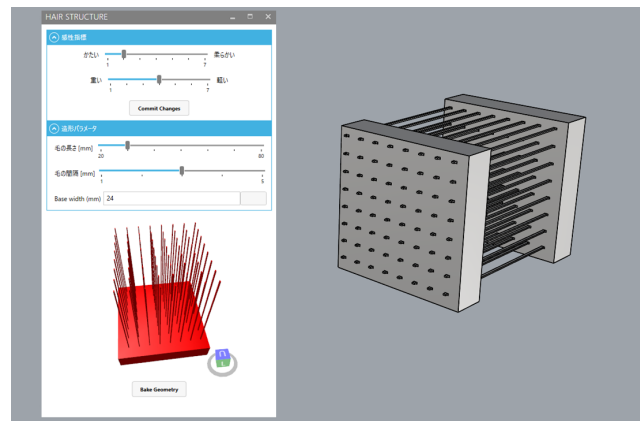


図14 設計支援システムのインターフェースと3Dモデルの出力例
Fig. 14 The design support system and an output example.

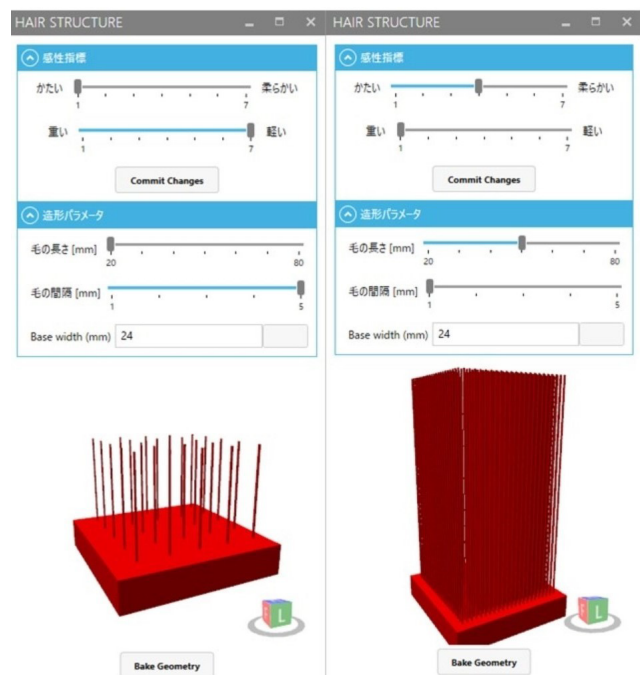


図15 パラメータ変更による3Dビューの変化
Fig. 15 Changing 3D view with sensibility parameters.

そのため、毛の長さは「20~80mm」の範囲、毛の配置間隔は「1mm~5mm」の範囲で調整可能とする。また、これらの造形パラメータに加えて、毛構造の土台の横幅を設定することができる。

感性指標と造形パラメータは連動しているため、一方を操作することでもう一方が自動的に調整される仕組みとしている。

7.2.2 システムを用いた設計方法

設計支援システムのインターフェースと作例された毛構造の3Dモデルの様子を図14に示す。ユーザが設計支援システムを立ち上げると、図14左のウィンドウに示されているインターフェースが表示される。感性指標と造形パラメータがスライダーで調整可能なUIとなっており、調整した結果はウィンドウ内で簡易的にプレビューされる。出力した

い造形パラメータに調整することができたら、UI 下部の Bake Geometry ボタンを押すことで Rhinoceros 上に 3D プリント用の毛構造の 3D モデルが出力される。この出力結果はそのまま 3D プリント可能なファイルフォーマットとしてエクスポートできるだけでなく、Rhinoceros の知識があるユーザであれば、この 3D モデルをさらに編集することもできる。

7.2.3 設計支援システムの実装

設計支援システムは Grasshopper を使用し、試作のために使用した毛構造の設計システム (図 1) を流用して実装した。インタフェースの実装には、Grasshopper のアドオンである Human UI^{*3}を使用した。システムは、スライダ操作によって入力された感性指標 (1~7) に対しリマップ処理を行う。毛の長さは「20mm~80mm」、毛の配置間隔は「1mm~5mm」の範囲でリマップされる。

現状では、Grasshopper の仕様上の問題で造形パラメータの調整によって計算処理が多い毛構造を表示するためには、やや時間が長く掛かってしまう。たとえば、柔らかさ 7 (毛の長さ 80mm)/重さ 1 (毛の配置間隔 1mm) の場合では処理が重くなり 1分 30秒ほど表示時間がかかる。そのため、Commit change ボタンを UI 上に設け、スライダで柔らかさとなめらかさを調整した後にボタンを押すことで、できるだけスムーズに 3D ビュー表示ができるようにすることで対応している。

8. 議論

3D プリンタによってさまざまなインタフェースが自作できるようになった。しかし、3D プリンタによる作品は形状に注目したものが多く、機構などの要素を組み込むことで機能性や質感を活かした作品を設計するためには必要な知識や技術が多いため、実現するためにはまだ課題が残っている。本研究では、毛のような微細構造に特性を持つ材料を組み合わせた応用例を示した。制作例を示したことにより、導電性/強磁性を付与した毛構造で入力/出力機能を持つ毛構造をインタラクティブ研究に活用できることを示した。また、ソフトレジンに植毛する方式を提案したことにより、毛の動きや電子部品の埋め込みについて可能性が広がり、シリコンモールドの作成によって毛構造や電子部品の埋め込みを安定して行えるようになった。また、毛構造は造形パラメータの調整によって柔らかい触感や軽い触感などを表現できることを調査し、毛構造を使って作品を作るためのシステムを設計・実装した。これらによって 3D プリンタを用いたインタフェースの試作の幅が広がったと考える。

8.1 設計支援システムの課題

設計支援システムを試作したことにより、Grasshopper をふだん使わない人でも毛構造を制作物に活用できる基盤を作ることができた。しかし、現状のシステムは、印象評価の結果より、造形パラメータの変化で触感が変化する傾向が分かったことからシステムの設計を考えた。そのため、印象評価の結果をもとに感性指標と造形パラメータの最大値/最小値をそれぞれ対応付け、間の変化を線形で補完した対応関係であり、複数の造形パラメータや素材の変更が印象に影響し合うことを十分に考慮できていない。感性指標の変更によって、要求どおりの印象の毛構造を設計することは現在のシステムでは不十分であると考え。そのため、感性指標と造形パラメータの関係をより明確にするための追加実験を行う必要があると考える。毛の長さや間隔などの造形パラメータがどのくらいの割合の変化で触感の変化や調査や造形パラメータを複数同時に変更した場合の触感の変化を調査するべきであると考え。また、素材自体の硬さが印象に影響している可能性についても調査するべきである。これらの調査による印象の変化もシステムに取り入れることによって設計できる毛構造のパターンを増やせると考える。

8.2 設計支援システムの充実化

設計支援システムによって、造形パラメータ調整を簡易化することができるようになったが、毛構造を制作物に活用するためには、モデリングだけでなく、モデルを 3D プリンタで出力する際にも調整が必要である。たとえば、5.2 節で述べたように、毛構造の 3D プリントでは、フィラメント温度や押し出し量を造形材料の推奨よりも高くする調整が必要な場合がある。材料ごとに 3D プリントの推奨を提示するなど、出力まで支援して毛構造の設計支援を充実化することができれば、毛構造がインタラクティブ研究により活用しやすくなると考える。

9. まとめと今後の展望

本研究では、3D プリントによって造形可能な毛構造を用いたインタラクティブ手法の構築を目指し、そのために毛構造へ導電性/強磁性を付与するための方式、ソフトレジンに植毛する方式を提案した。毛構造は 3D プリントの利点を活かし、インタラクティブの目的に合わせて自由に触感を変更することができるため、制作物への没入感を向上させることにつながる。提案した方式を元に、毛構造を電子的に制御可能な新たなインタラクティブ・コンポーネントとして確立していきたい。

謝辞 本研究の一部は、科研費 20H04231 の支援を受けた。

*3 <https://www.food4rhino.com/en/app/human-ui>

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, *Proc. WISS2017*, 日本ソフトウェア科学会 (2017).
- [2] Lee, C.-J., Tsai, H.-R. and Chen, B.-Y.: Hairtouch: Providing stiffness, roughness and surface height differences using reconfigurable brush hairs on a vr controller, *Proc. 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1-13 (2021).
- [3] Degraen, D., Zenner, A. and Krüger, A.: Enhancing texture perception in virtual reality using 3D-printed hair structures, *Proc. 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1-12 (2019).
- [4] Takahashi, H. and Kim, J.: Designing a hairy haptic display using 3D printed hairs and perforated plates, *Adjunct Proc. 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.1-3 (2022).
- [5] 鎌田航誠, 高橋治輝, 塚田浩二: 導電性・強磁性・及び土台の可撓性を持つ毛構造の造形手法の提案, *Proc. WISS2023*, 日本ソフトウェア科学会 (2023).
- [6] Laput, G., Chen, X. and Harrison, C.: 3D printed hair: Fused deposition modeling of soft strands, fibers, and bristles, *Proc. 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, pp.593-597 (2015).
- [7] Ou, J., Dublon, G., Cheng, C.-Y., Heibeck, F., Willis, K. and Ishii, H.: Cillia: 3D printed micro-pillar structures for surface texture, actuation and sensing, *Proc. 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.5753-5764 (2016).
- [8] Umezu, S., Ohkubo, M., Ooide, Y. and Nojima, T.: Hairlytop interface: A basic tool for active interfacing, *Adjunct Proc. 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.95-96 (2014).
- [9] 中島康祐, 伊藤雄一, 築谷喬之, 藤田和之, 高嶋和毅, 岸野文郎: Fusa 2 touch display: 大画面毛状マルチタッチディスプレイ, *情報処理学会論文誌*, Vol.53, No.3, pp.1069-1081 (2012).
- [10] 遠藤暁友, 原田雅文, 錦織さくら, 佐藤俊樹: 微弱な接触を検知可能な毛状タッチセンサ, *Proc. WISS2022*, 日本ソフトウェア科学会 (2022).
- [11] Li, J., Li, M., Ji, J., Pan, D., Fan, Y., Zhu, K., Yang, Y., Yan, Z., Sun, L., Tao, Y. and Wang, G.: All-in-one print: Designing and 3D printing dynamic objects using kinematic mechanism without assembly, *Proc. 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '23*, Association for Computing Machinery (2023).
- [12] Leigh, S.J., Bradley, R.J., Purssell, C.P., Billson, D.R. and Hutchins, D.A.: A simple, low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors, *PLOS ONE*, Vol.7, No.11, pp.1-6 (2012).
- [13] Schmitz, M., Khalilbeigi, M., Balwierz, M., Lissermann, R., Mühlhäuser, M. and Steimle, J.: Capricate: A fabrication pipeline to design and 3D print capacitive touch sensors for interactive objects, *Proc. 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, UIST '15*, pp.253-258, Association for Computing Machinery (2015).
- [14] 片平建史, 武藤和仁, 橋本 翔, 飛谷謙介, 長田典子: Sd法を用いた感性の測定における評価の階層性, *日本感性工学会論文誌*, Vol.17, No.4, pp.453-463 (2018).

鎌田 航誠

2000年生。2023年公立はこだて未来大学システム情報科学研究科卒業。同年同大学大学院システム科学研究科入学。

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)。同年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。芸術科学会, ACM各会員。

塚田 浩二

1977年生。2005年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科博士課程修了。博士(政策・メディア)。産業技術総合研究所, お茶の水女子大学, 科学技術振興機構さきがけ研究員を経て, 2013年より公立はこだて未来大学情報アーキテクチャ学科准教授。2023年より同教授。日用品インタフェース, マテリアルインタラクション等の研究に従事。2012年イグノーベル賞(音響学)受賞。