3D プリントした毛を用いた触覚ディスプレイの提案

高橋 治輝 *

概要. 本稿では，3D プリンタで出力した毛と部品を組み合わせて制作可能な毛状インタフェースを提案する．小さな穴を開けたプレートに造形した毛を通し，その毛の逆側を筐体の内部で動かすことによって毛先を制御する．制作に必要な構成要素と造形環境，組み立て方法について述べ，プロトタイプシステムを用いて出力した作例について紹介する．

1 はじめに

毛状の素材や細いアクチュエータの集合体を制御することで，毛状インタフェースを実現する研究が行われている [3, 2]．この触覚ディスプレイにより，一般的な液晶ディスプレイでは困難な視覚的・触覚的な情報提示が可能となる．本稿では，3D プリンタを用いた毛の造形 [1, 4] を活用した毛状インタフェースの設計を試みた（図 1）．提案する造形物は，箱状の造形物（ケース）の上部に毛を蓄えており，1 本 1 本の毛がプレートの小さな穴（毛穴プレート）を通ってケース外部へと突出している．毛の逆側は造形物内部にあるプレート（動作プレート）と接続されており，穴を支点として「てこ」のように動く．このプレートを垂直・水平移動あるいは回転させて，外の毛の部分を制御する仕組みである（図 1b）．

これまでに提案された毛状のインタフェースと比較して，本稿で提案する造形物には，制作が容易で安価であること，毛の部分が細く高密度であること，モータやセンサを組み込んで拡張できることなどの 3D プリンタの利点が反映された特徴がある．また，毛の長さや傾きを変更できるため，毛の 3D プリント手法では困難であった形状の制作も可能としている．

2 毛の造形を用いた触覚ディスプレイ

2.1 構成要素

ケース：すべての部品を収納するための筐体（図 1a, b）．上部・下部に分けて設計しており，間に動作プレートを挟み，上部の溝に毛穴プレートをはめ込む．現在は 1 辺が 60 mm の立方体としている．

毛：先行研究 [4] の手法を用いて造形した毛構造（図 2a）．壁に両端が固定された状態で出力され，片側をカッターナイフなどで切り離して利用する．先行研究では 3D プリンタを制御する命令群（Gcode）を直接記述する方法で造形していたが，本手法では

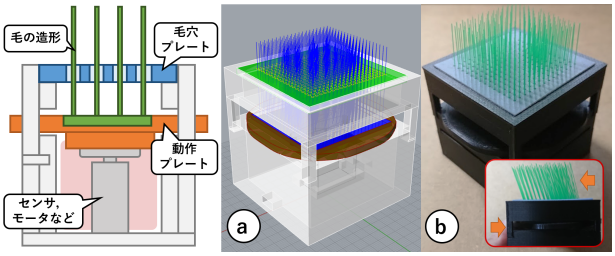

図 1. 毛の造形を用いた触覚ディスプレイ.

この部分を 3D モデルで作り，スライサソフトウェアのパラメータ調整で狙い通りの造形パスを出力することを可能とした．具体的には，Ultimaker Cura にて，Z Seam Alignment を Sharpest corner，Print Thin Walls を True，Combing Mode を Within Infill とする．3D モデルはノズル幅よりわずかに太い 0.42 mm 幅の梁を並べて作成した．

動作プレート：毛全体をケース内部で動かすためのプレート（図 2b）．表側には毛の片側に残した壁を嵌め込むための溝を作り，裏面にはプレートを動かすための機構を作っている．図 2b では，サーボモータのホーン部分に装着するための溝を設けた．また，ケースよりも大きなプレートにすることで，外部に手で操作可能な部分を作ることができる．

毛穴プレート：造形した毛を通し，毛を制御するためのプレート（図 2c）．毛と同じ間隔で穴を並べており，表側では直径 1.2 mm，裏側では直径 1.8 mm となる円柱で穴を開けた．これは出力する 3D プリンタの精度を踏まえて決定した値であり，裏側を広くすることで毛の挿入を容易にする．

櫛：毛と同じ間隔で作成しており（図 2d），毛を毛穴プレートに通すために活用する．また，この櫛 2 枚を毛穴プレートの代わりに用いることもできる．

2.2 造形環境・組み立て

出力する部品に応じて，熱溶解積層方式（Creality CR-10 V3）と光造形方式（Elegoo Mars）を使い分けて造形した．熱溶解積層方式ではケースと毛，動作プレート，櫛を出力し，材料はすべて PETG（Polymaker PolyMax PETG）を使用した．光造

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

* 明治大学総合数理学部

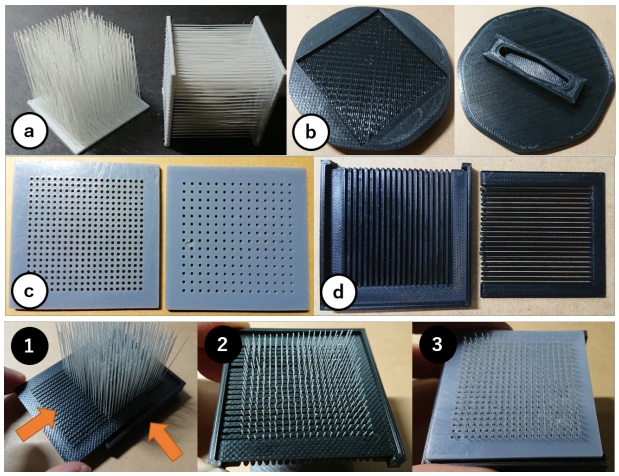

図 2. 造形物を構成する部品（a–b）と毛穴プレートの組み立て（1–3）.

形方式は毛穴プレートの穴を可能な限り小さく造形するために使用し，材料は SK 水洗いレジンを使用した．なお，すべての部品を熱溶解積層方式で造形することも可能で，より一般的な材料である PLA や ABS でも出力できることを確認している．この場合，穴の直径や毛の密度，強度などに課題が生じる．

部品の組み立ては，動作プレートをケースの間に挟むように配置し，各部品に用意した接続部を組み合わせるだけで良い．しかし，数百本ある毛を一度に毛穴プレートに通す作業は，そのままの状態ではほぼ不可能である．そこで，まず櫛 2 枚を毛の付け根に 2 つの方向から差し込み（図 2(1)），これを持ち上げることで毛を短い状態で整える（図 2(2)）．ここにプレートを押し付けるとすべての毛を一度に毛穴プレートに通すことができる（図 2(3)）．

2.3 システム

構成要素で述べた 3D モデルを生成するシステムを Rhinoceros および Grasshopper を用いて実装した．前述したいくつかのパラメータに加えて，毛の生成に関するパラメータ，各プレートの厚みやマージン，動作プレートとモータとの噛み合わせ部分（図 3 右）の調整が可能となっている．また，ジオメトリのブーリアン演算などの負荷が高い処理をバイパスしてプレビューする仕組みにしており，パラメータを変化させた結果は即座に確認できる．

3 作例

提案手法を用いたインタフェースの作例として，毛の部分を動かすことで実現可能な触覚ディスプレイについて紹介する．図 3 は動作プレートを垂直移動，水平移動，回転させたときの毛の様子を示したものであり，図の右にはそれぞれのプレートの裏側の構造を示した．なお，サーボモータは TowerPro SG-90，モータドライバは PCA9685 を使用し，Arduino UNO で動作させた．

毛を垂直方向に動作させることによって，インタフェースから出ている毛の長さを変更することができる．指先で触れた際に，短い毛はチクチクとした硬い触感が得られ，長い毛では柔らかい触感が得られる．またケース内部に毛を収納することも可能であるため，必要に応じて毛の部分を出現させるような応用も可能である．水平方向に移動させると，毛穴プレートを支点として毛が傾いた状態を作ることができる．これによって，毛に流れを作ったり寝かせることが可能となり，触った際の方向提示などに応用できる．毛を回転させたとき，それぞれの毛の移動量は回転軸との距離によって異なるため，外側に位置する毛のほうが大きく捻れて広範囲に広がる．

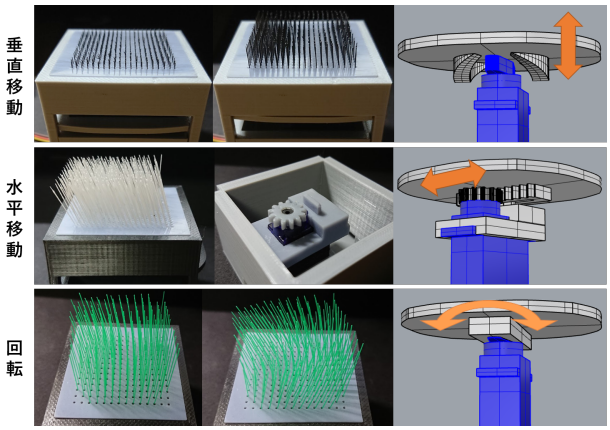

図 3. 制作例．垂直移動はモータのホーンで押し上げる構造とし，水平移動は造形したギアを用いた．

4 議論および展望

各構成要素にさまざまな工夫を凝らすことで多様なインタフェースの設計が可能となる．たとえば，モータなどの電子部品に限らず，バネやゴム，3D プリントした機構などを仕込むことで動作プレートの動きを拡張することができる．事前に大きさなどの仕様を決めておけば，部品ごとの作り直し・組み立て直しも容易である．現状で明らかとなっている制約は造形物の大きさである．各部品は十分に強度のある厚みで出力する必要があり，3D プリンタの造形サイズの制約もあることから，小型化・大型化には限界がある．また，毛に用いる材料によっては動作後に毛が変形したり，癖がついたりする様子も観察された．本稿では毛先の動きを用いた触覚ディスプレイの例を紹介したが，同じ原理で入力デバイスの設計も可能であると考えている．動作プレートと毛の部分が連動しているため，内部にセンサなどを搭載すれば毛先に触れたことを検知することができるだろう．今後の展望として，この仕組みを曲面に対して適用すること，単一の機構で複数の動きを可能とすることに取り組んでいる．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H04231 の助成を受けたものです.

参考文献

[1] G. Laput, et al. 3D Printed Hair: Fused Deposition Modeling of Soft Strands, Fibers and Bristles. In *Proc. of UIST2015*, pp. 593–597, 2015.

[2] T. Nojima, et al. Hairlytop interface: an interactive surface display comprised of hair-like soft actuators. In *Proc. of the 13th World Haptics Conference*, p. 431–435, 2013.

[3] Y. Sugiura, et al. Graffiti Fur: Turning Your Carpet into a Computer Display. In *Proc. of UIST2014*, p. 149–156, 2014.

[4] 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 *Proc. of WISS2017*, 2017.