



指先による毛の知覚における 太さと密度の影響に関する調査

An Investigation of the Influence of Thickness and Density
on the Perception of Hair by the Fingertip

倉持直弥¹⁾, 櫻井翔¹⁾, 野嶋琢也²⁾, 広田光一¹⁾

Naoya KURAMOCHI, Sho SAKURAI, Takuya NOJIMA, Koichi HIROTA

1) 電気通信大学 情報理工学研究科

(〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {naoya-kuramochi, sho, hiroya}@vogue.is.uec.ac.jp)

2) 電気通信大学 情報理工学研究科 (〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, tnojima@nojilab.org)

概要: 仮想空間でリアルな触覚提示を行うために、提示面に毛構造を用いる方法が知られている。しかし、提示面に毛構造を用いると表現できる触覚の種類に限界が生じる課題がある。本研究では、毛構造を用いずに毛を知覚させるための基礎研究として、指先で毛構造に触れた際の人間の認識に着目し、毛構造がもつ特徴のうち毛の太さと毛の密度の 2 要素について、指先で毛と知覚する定量的条件と毛らしさの認識に与える効果を調査した。

キーワード: 触覚, 毛, 3D プリンタ

1. はじめに

髪の毛やペットの毛など、多種多様な毛が我々の身近に存在する。これらの毛に触れる行為について、猫を撫でたり触れたりすると気分が良くなる傾向 [1] や、髪の毛に触れ髪の毛のキメを感じるほど愛着形成を促進させるオキシトシン量が上昇する結果 [2] など、実際の動物の毛や髪の毛に触れることで、様々な効果を得られる。

また、仮想空間や拡張現実上で体験者の没入感を高めるために、人間の五感のひとつである触覚に対してリアルな触覚提示を行うことが必要とされている。この触覚提示のうち、毛並みの表現や毛や布が持つ柔らかさの表現を実現するために、触覚提示面に毛を用いた研究が行われている。PBT 製の毛を利用して硬さや粗さを指先に提示する装置「HairTouch」[3] は、毛の長さや角度をモーターで制御することで毛並みや柔らかさを表現している。また、3D プリンタで毛構造を再現した印刷物と VR 映像を組み合わせる触覚を提示する方法 [4] では、実際の毛の代わりに毛の形状を模したディスプレイを長さ別に用意することで、機械による制御なしに複数の触覚情報を提示することができる。これらの手法はリアリティのある毛の感覚の提示に大きく寄与することが示されている。

しかし、これらの手法で提示した毛の感覚は主観的な評価にのみ基づいているため、毛が指にあたることによる毛を触った感覚を生じる物理的要因については明らかになっていない。また、指に触覚情報を提示する面に毛や毛を再現した構造を用いているため、提示できる毛の種類が使用

した毛構造の特徴に依存してしまう。そのため、複数の毛の種類での提示や、硬い表面や複雑な細かい表面のテクスチャなどの毛以外の触覚の提示が難しい問題がある。これらの問題を解決するためには、人が毛に触っていると感じる物理的要因や人間が毛らしいと知覚する特性を明らかにする必要がある。これが解明されると触覚提示における毛の表現の多様化やリアリティの向上が見込める。

本研究では、人間が毛に触れる際に毛らしいと感じる刺激に関する人間の特性を明らかにすることを目的とする。なお、毛のように感じる触覚刺激を「毛らしさ」と呼ぶことにする。また、本研究では、毛がもつ触覚刺激のうち、「毛の太さ」及び「毛の密度」の 2 要素について調査をおこなった。毛の太さは毛の断面の直径に、毛の密度は毛の整列時の間隔に着目した。

2. 人工的な触覚刺激の提示手法

毛らしさの知覚特性を要素別に調査するためには、要素ごとに触覚刺激を人工的に再現することが必要である。そのため、土台の表面に半円の円柱を並べた光造形 3D プリンタの印刷物 (図 1) を用いて調査した。3D プリンタは Formlabs 社製の Form 3+ を、レジンは Formlabs 社製の Clear Resin V4 を用いた。印刷物は、一辺が 45 mm の正方形上に円柱が図 1 の横方向に並んだ形状にした。毛の太さを円柱の直径 d (mm) と、毛の密度を円柱の中心間距離 l (mm) として図 2 のように定義し、円柱の直径を $d = 0.25, 0.35, 0.50, 0.75, 0.90$ の 5 条件、円柱の中心間距離を $l = d - 0.3, d - 0.2, \dots, d + 1.0$ の 0.1 刻みで 14 条件設定した。そのうち、3D プリンタで印刷

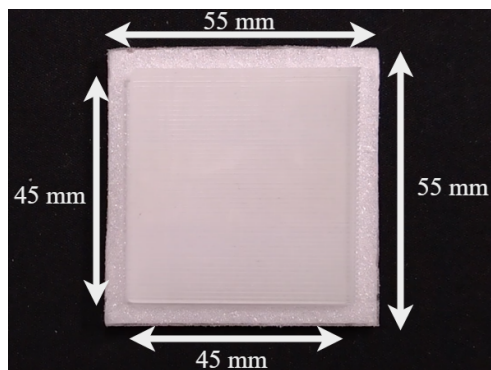
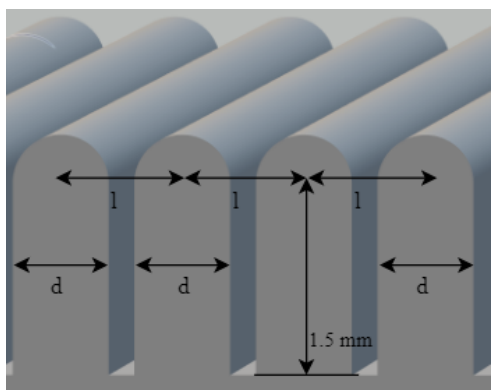


図 1: 3D プリンタで作製した人工刺激提示物

図 2: 円柱の直径 d と円柱の中心間距離 l の位置関係

できない精度の条件 $((d, l) = (0.25, -0.05), (0.25, 0.05), (0.35, 0.05))$ を欠損値とし、合計 67 条件を人工刺激提示物として用意した。

3. 実験

3.1 実験概要

本実験は、ウィッグ、テグスと第 2 章で作製した人工刺激提示物を触り評価することにより、主観的に毛らしさが高いと知覚する毛の太さと毛の密度の条件や領域を調査することを目的とする。なお、実験参加者にとって最も身近と考えられるため、毛の中で髪の毛に焦点を当てた。実験は、実験参加者に人工刺激提示物を単体で触らせて髪の毛らしさを評価するタスク 1 と、ウィッグとテグスを単体で触らせて髪の毛らしさを評価するタスク 2 の 2 つを行った。

3.2 実験環境

実験環境全体の様子を図 3 に、実験環境内部の様子を図 4 に示す。ウィッグやテグス、人工刺激提示物の形状や色などの視覚情報による髪の毛らしさのバイアスを無くするため、黒い布で覆われた箱の中で実験参加者にウィッグやテグス、人工刺激提示物を触らせた。

実験では、実験参加者に提示物の触り方を次の条件を満たしながら自由に触らせた。条件は、実験参加者の利き手の人差し指の第一関節から爪の内側までの指の腹の領域を用いて触ること、触る方向は縦方向や横方向など様々な触り方を行うこと、指で提示物を押す力（以下、指圧）を 50 g

とし、前後 10 g を許容範囲とすることとした。

実験で使用したウィッグは、NoryNick 社製を使用した。素材は約 180 °C耐熱性ファイバー製で、色は橙色、太さは 0.08 mm であった。また、テグスは高木網業社製を使用した。素材はナイロン製で、色は半透明の白色、太さは 0.25 mm, 0.35 mm, 0.5 mm, 0.75 mm, 0.9 mm の 5 種類を使用した。素材は一般的な毛と異なる色であるが、実験は視覚情報を遮断して行うため、実験参加者の印象への影響はない。これらの素材を直線状に成形した後、種類別に 50 cm の長さに切りそろえ、8 mm 径の束にし、片側の端点をゴムで結んだ図 5 のような形状にした。

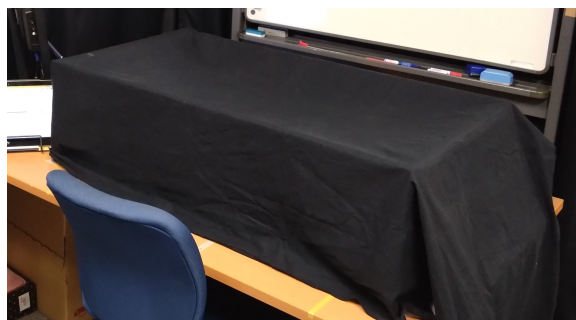


図 3: 実験環境全体



図 4: 実験環境内部と提示物の触り方



図 5: テグス（左 5 種類）とウィッグ（右 1 種類）

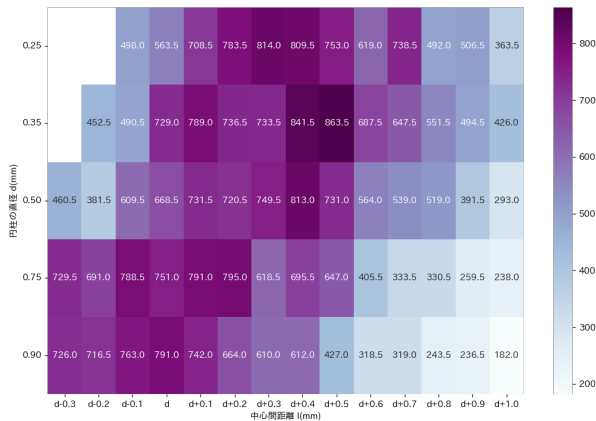


図 6: 実験参加者内で平均した評価値の合計のヒートマップ

3.3 実験手順

3.3.1 事前準備とトレーニング

実験参加者に、実験参加者の主観的な髪の毛の毛らしさを指標に評価する点、毛の太さと毛の密度に焦点をあてて髪の毛の毛らしさを評価する点を説明した。次に実験参加者にトレーニングとして、指定された触り方が自然にできるように、TANITA 製のキッチンスケールを使用して練習させた。

3.3.2 タスク 1. 人工刺激提示物を使用した主観的な髪の毛の毛らしさの評価

実験参加者はまず、人工刺激提示物を触る前の指先の感覚を統一すること、触り方を復習することを目的としてキッチンスケールを 5 秒前後触った。次に、実験者の合図で手を実験装置の箱の中に入れ、提示された人工刺激提示物 1 個を 5 秒間触った。最後に、触って感じた主観的な髪の毛の毛らしさの度合いを、左端が「全く髪の毛の毛らしくない」、右端が「最高に髪の毛の毛らしい」とした VAS スケールで回答した。この一連の流れを 1 試行とし、太さ条件毎に 14 条件をランダムに提示し、順序効果を小さくするために 2 セット行い、合計 140 試行実施した。

3.3.3 タスク 2. ウィッグ、テグスを使用した主観的な髪の毛の毛らしさの評価

タスク 1 の方法と同様に実施した。提示物として、形状を加工したウィッグ 1 種類とテグス 5 種類を使用した。これを順序効果を小さくするためにランダムに提示し、3 セット行い、合計 18 試行実施した。

4. 結果

実験参加者として、22 歳～29 歳の 16 名（右利き 15 名、左利き 1 名）を対象とした。

4.1 タスク 1 の結果

人工刺激提示物を単体で触ったときの髪の毛の毛らしさの評価について、実験参加者内で平均した評価値の合計（以下、合計値）を、縦軸 d 、横軸 l を軸にとった heatmap として図 6 に示したところ、評価値が高い分布が斜めに広がった。そこで、円柱の中心間距離 l に円柱の直径 d の値を代入し、合計値を目的変数に、円柱の直径と円柱の中心間距離を説明変数

表 1: 2 次曲線の近似関数と決定係数

円柱の太さ	2 次関数での近似曲線	決定係数 R^2
0.25 mm	$-1242.3(x_l - 0.630)^2 + 787.0$	0.806
0.35 mm	$-1176.6(x_l - 0.706)^2 + 808.3$	0.848
0.50 mm	$-1012.4(x_l - 0.793)^2 + 747.8$	0.844
0.75 mm	$-647.3(x_l - 0.716)^2 + 765.5$	0.907
0.90 mm	$-422.9(x_l - 0.603)^2 + 760.9$	0.934

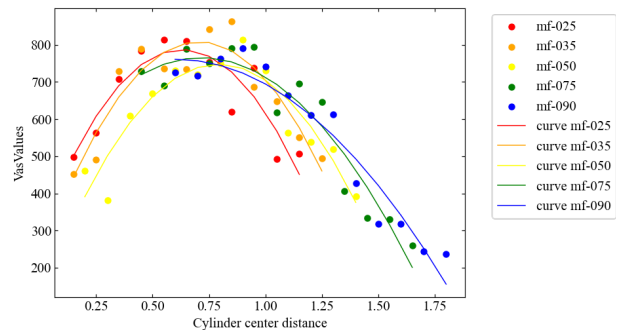


図 7: 回帰直線込みの評価値の散布図

として主効果のみの重回帰分析を行ったところ、円柱の中心間距離と定数項が 0.1% 水準で有意であったが、自由度調整済み決定係数は $R^2 = 0.367$ であった。さらに、縦軸に合計値、横軸に円柱の中心間距離をとった散布図を円柱の直径条件別に図 7 に示し、条件別に散布図の点の分布から 2 次関数の近似曲線を推定したところ、 $0.6 < x_l < 0.8$ の区間で 2 次関数の頂点が現れ、前後 0.1 mm を含めた $0.5 < x_l < 0.9$ の区間で高い髪の毛の毛らしさの評価値を得られた。各 2 次関数の近似曲線と決定係数は表 1 に示す。

4.2 タスク 2 の結果

素材となるウィッグとテグスを触ったときの髪の毛の毛らしさの評価について、実験参加者内で平均した評価値の合計（以下、合計値）を箱ひげ図、蜂群図として図 8 に示したところ、太さが細くなるほど評価値が高い結果が得られた。また、要因内の群の組み合わせによるすべての条件について、Shapiro-Wilk 検定を行ったところ、N-wig（ウィッグ）条件、N-mf-025（0.25mm 径テグス）条件において $p < 0.05$ でデータの正規性が認められなかった。そこで Friedman 検定を用いて分析を行った結果、条件の違いによって値の位置が変わることが 0.1% 水準で有意であった ($\chi^2(5) = 72.05$, $p < 0.01$, $r = 0.772$)。

5. 考察

5.1 タスク 1 の考察

毛の太さについて、図 6 の heatmap から、わずかな差であるが円柱の直径が小さいほうが、髪の毛の毛らしさの評価値の実験者内平均の合計値が高く見られたが、重回帰分析の結果から説明力のある変数といえなかった。この理由として比較刺激提示物では円柱が平面に並んだ形状をしていて、毛の太さの違いは、円柱の側面の曲率の違いのみであったことから、毛の太さを知覚するのが難しかったのではない

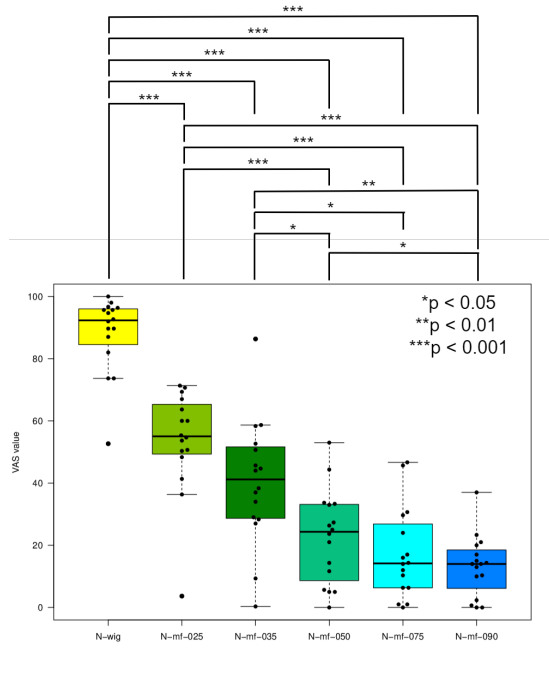


図 8: ウィッグとテグスの評価値

かと考える。

毛の密度について、本実験では毛の整列時の間隔に注目して実験を行った。円柱の太さ条件ごとに2次関数を近似直線としてフィッティングした図7と表1の結果より、円柱の中心間距離が0.50 mm から0.90 mm の範囲で高い評価が得られ、曲線の決定係数もすべての条件で $R^2 = 0.8$ 以上となったことから2次曲線の近似関数で説明できていると予想される。このことから、毛の密度について、毛の太さに寄らず毛の間隔が0.50 mm から0.90 mm の領域で毛らしさの効果が高くなるといえる。

5.2 タスク2の考察

ウィッグやテグスを触った時の髪の毛らしさの評価に対しFriedman 検定を行った結果、有意差が認められた。また、多重比較の結果、太さが細くなればなるほど髪の毛らしさの評価値が上昇した。このことから、0.35 mm 以下の太さの領域において、太さが細いほど髪の毛らしく感じる事がいえ、0.35 mm より大きい太さの領域は髪の毛らしさの印象に効果を与えないことがいえる。

また、ウィッグは他のテグスの条件に対し髪の毛らしさの評価値に有意差が見られた。この理由として、ウィッグの素材はテグスと比べて素材の繊維が柔らかかったため、特に髪の毛らしく感じる事ができたのではないかと予想する。ただし、今回の実験では柔らかさについては調査していないため、この点は今後の課題とする。このほか、0.25 mm 径のテグスと0.35 mm 径のテグスの間に有意差は認められなかつ

た。上記の結果から、髪の毛らしさの調査として、ウィッグ、0.25 mm 径テグス、0.35 mm 径テグスが髪の毛らしさの評価が高く、太さの値として0.35 mm 以下の領域で髪の毛らしさの評価が高いことがいえる。

6. おわりに

本研究では、人間が毛に触れる際に毛らしいと感じる刺激に関する人間の特性を明らかにすることを目的とした。そのために、毛が持つ触覚刺激である「毛の太さ」と「毛の密度」に焦点をあてて、毛と知覚する定量的条件と毛らしさの認識に与える効果をはかる調査を、指先でウィッグやテグス、3D プリンタで作製した印刷物に触る方法で行った。

毛の太さについて、直径が0.35 mm 以下の領域で髪の毛らしさを感じ、太さが細いほどより髪の毛らしく感じる事が明らかになった。毛の密度については、毛が整列した形状において0.50 mm から0.90 mm の範囲が髪の毛らしく感じる事が明らかになった。さらに、髪の毛らしさの評価において、毛の密度が毛らしさを与えることに優位に作用したこともわかった。

今後の展望として、本研究は人間が毛に触れることで得られる毛に対する知覚特性を明らかにすることが目的である。そのため、毛らしさを与えるために必要な触覚要素のうち、本研究で調べられていない他の毛が持つ触覚要素についても実験を行い、それぞれの要素の特徴と、どの触覚要素が強く髪の毛らしさに効果を与えているかを明らかにする調査を引き続き行う方針である。

参考文献

- [1] A. Kobayashi, Y. Yamaguchi, N. Ohtani, and M. Ohta: The Effects of Touching and Stroking a Cat on the Inferior Frontal Gyrus in People, REVIEWS AND RESEARCH REPORTS, pp. 473-486, 2017.
- [2] 花王：“髪の毛キメ”を感じた時にオキシトシン量が上昇 - 髪に触れた時の感覚が体や心を与える影響 -, <https://www.kao.com/content/dam/sites/kao/www-kao-com/jp/ja/corporate/news/2022/pdf/20220921-002-01.pdf>, 2022. (最終閲覧日:2023-02-02)
- [3] C. Lee, H. Tsai, and B. Chen: HairTouch: Providing Stiffness, Roughness and Surface Height Differences Using Reconfigurable Brush Hairs on a VR Controller, CHI '21, pp. 1-13, 2021.
- [4] D. Degraen, A. Zenner, and A. Krüger: Enhancing Texture Perception in Virtual Reality Using 3D-Printed Hair Structures, CHI '19, pp. 1-12, 2019.