

# 体毛一毛包受容器構造を模した触覚増強機構

Tactile Enhancement Structure Mimicing Hair Follicle Receptor

岡崎龍太<sup>1)</sup>, 佐藤未知<sup>2)</sup>, 福嶋政期<sup>3)</sup>, 古川正紘<sup>3)4)</sup>, 梶本裕之<sup>3)5)</sup>

Ryuta OKAZAKI, Michi SATO, Shogo FUKUSHIMA, Masahiro FURUKAWA and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 人間コミュニケーション学科

(〒182. 8585 東京都調布市調布ヶ丘 1. 5. 1, okazaki@kaji-lab.jp)

2) 電気通信大学 人間コミュニケーション学専攻

(〒182. 8585 東京都調布市調布ヶ丘 1. 5. 1, michi@kaji-lab.jp)

3) 電気通信大学 総合情報学専攻

(〒182. 8585 東京都調布市調布ヶ丘 1. 5. 1, {michi, shogo, furukawa, kajimoto}@kaji.lab.jp)

4) 日本学術振興会特別研究員 PD, 5) 科学技術振興機構さきがけ

**Abstract:** We propose a tactile enhancement structure mimicking hair follicle receptor. Comparing with other receptors, hair follicle receptor has specificity that part of receptor is exposed to outside. Also, recent research showed that skin hair contributes perception of minute force which cannot be perceived with hairless skin. We considered that we can perceive minute force which is normally impossible to perceive by extending this structure. Our idea of tactile enhancement structure mimics hair follicle receptor. In this mechanism, a matrix of artificial skin hair is driven by minute force from outside and it drives the skin surface. This structure can be used at any part of the human body because it is fully composed of passive elements.

**Key Words:** Haptic, Interface, Wearable

## 1. はじめに

触覚に関する研究は昔から数多くなされてきており、各触覚受容器の時間的・空間的なレンジが明らかにされてきている。いうまでもなく、全てのレンジにわたって応答可能な受容器は存在しないが、近年の触覚の研究によって、知覚不可能なほど微小な力の中にも重要な情報が含まれていることが知られてきた。

そのような中で佐野らは、指先に装着するだけで人間の触覚受容器のレンジを変更し、微小な変位を知覚可能にする「触覚コンタクトレンズ」[1]を開発した。人間のセンサレンジを変えることで通常知覚不可能な力を知覚できるようになり、本来人間には不可能な作業を行うことができると期待されている。

一方、人工的ではなく、人間が生来持っている機構の中にも触覚のレンジを変更する機能が備わっている。その一例が毛包受容器である。人間の持つ触覚受容器の中でも、体毛一毛包受容器からなるセンシング構造は、センサの一部である体毛が体外に露出している点で他の受容器に比して特異性を持つ(図 1)。通常は人間の皮膚が持つインピーダンスによって知覚不可能な微小な力が、毛包受容器によるインピーダンス変換によって知覚されていると考えられる現象が報告されている。佐藤ら

は、無毛部の皮膚では知覚されないような微小な力が体毛の寄与によって知覚される現象について明らかにした[2]。

本研究では、人間の持つ体毛一毛包受容器構造を模した触覚増強機構を提案する。本機構は図 2 に示すような断面を持ち、マトリクス状に並べられた人工毛が外界からの微細な刺激により駆動され、皮膚表面への刺激を増強する。前述の触覚コンタクトレンズは腕部などの曲面に装着した場合に触覚拡大機構が大きく損なわれると考えられ、事実として装着部は主に手掌部に限られていた。一方で本機構は装置の装着面が湾曲していても触覚の拡大が可能である。また能動素子を持たないため、電氣的制御機構を一切持たず、形状の自由度が高い。よって、指先はもちろん、あらゆる身体部位で広範囲に装着が可能である。

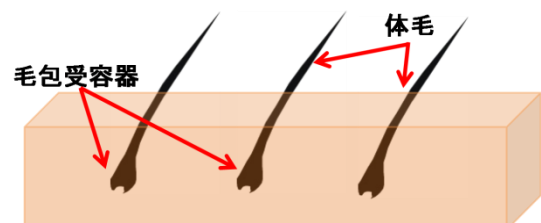


図 1. 毛包受容器の構造

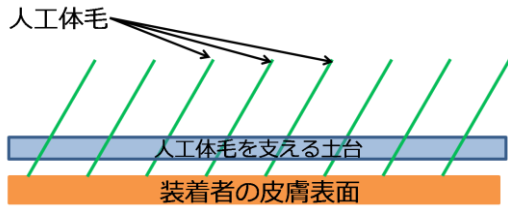


図 2. 提案機構の概要図

## 2. 提案手法

### 2.1. 提案手法のモデル化

本研究で提案する機構のモデルは図 3 のようになる。今、皮膚に接する側の人工体毛の長さを  $L_1$ 、土台と皮膚間の距離を  $L_2$ 、外界に飛び出している人工体毛の長さを  $L_3$  とする。土台の厚みは微小として無視する。外界から力  $F_1$  が加えられ、人工体毛が  $\theta_1$  だけ駆動されたとすると、その駆動に必要なエネルギー  $E$  は次の様に表される。

$$E = F_1 \cdot L_3 \sin \theta_1 \quad (1)$$

この時、回転軸と土台との摩擦を無視すると、皮膚表面側で起こる仕事は、

$$E = F_2 \cdot L_1 \sin \theta_1 \quad (2)$$

となる。ここで土台を境界面とした時の人工毛内外の長さ比  $\alpha = L_3/L_1$  は大きいほど外界からの力を大きく増幅して皮膚に伝える。つまり  $\alpha$  が大きければより微細な力を知覚できるといえるが、その為には  $L_3$  を大きくするか、 $L_1$  を小さくする必要がある。しかし  $L_3$  を過度に大きくすると、装置の大型化という弊害が考えられるため、実装においては  $L_1$  を可能な限り小さくする必要がある。

一方で、 $F_2$  によって皮膚表面に引き起こされる歪  $\Delta d$  が皮膚表面変位の閾値を越えなければ、いくら外界からの微細な力が増幅されても皮膚表面でその力を知覚することはできない。Gescheider によると、皮膚表面変位の閾値として必要な  $\Delta d$  は、低周波領域において最大で 1mm である [3]。この知見を基に触覚に必要な力閾値  $F1[N]$  を求める。前野によると皮膚表皮、真皮、皮下組織の縦弾性係数は、それぞれ  $1.36 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $8.0 \times 10^4 \text{ Pa}$ ,  $3.4 \times 10^4 \text{ Pa}$  である [4]。今、皮膚を単一な弾性体とみなしてその縦弾性係数をその平均値とすると、約  $4.25 \times 10^4 \text{ Pa}$  となる。人工体毛の直径を  $0.50 \text{ mm}$  (断面積  $0.20 \text{ mm}^2$ ) とすると、この断面積をもつ人工体毛が皮膚を  $1 \text{ mm}$  歪ませるのに必要な仕事  $F_1[N]$  は

$$F_1 = 4.25 \times 10^4 \times 2.0 \times 10^{-7} \quad (3) \\ = 8.50 \times 10^{-3} \text{ N}$$

となる。これより、刺激の触覚に必要な力閾値  $F_1$  は  $8.50 \times 10^{-3} \text{ N}$  となる。理論上は  $\alpha = 4$  の本機構を装着することで、知覚に必要な外力を閾値  $1/4$  の  $2.12 \times 10^{-3} \text{ N}$  に減少させる事が期待できる。

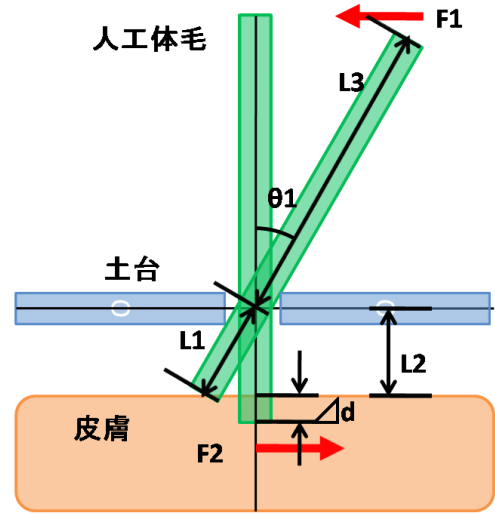


図 3. 提案機構のモデル断面図

## 3. 水面知覚の増大効果の検証

### 3.1. 水面知覚増大機構の実装と検証

前述の触覚増強機構を用いることで、実際に皮膚で知覚される力が増強する事を確かめるため、佐藤らによって報告された、有毛部で水面をリング状に知覚する水面知覚の現象を用いて検証を行った。本機構を用いることで様々な刺激の増大が期待できるが、微風や流体は環境のコントロールが難しく、実験環境の統制とその信頼性を担保することが困難である。その点、水面は環境条件の統制が非常に簡易に行える。また、水面の鮮明さという尺度で容易に評価を行うことができる。よって本稿では水面知覚の鮮明さを増強することを目的に、装置の製作、実証を行った。

様々な素材を用いて試作を行った結果、シリコン(信越シリコン, KE-109-A/B)と光ファイバ(三菱レイヨン, エスカ,  $\Phi = 0.50 \text{ mm}$ )を用いて、体毛一毛包受容器構造を模倣した装置を製作した。(図 4) これは薄いシート状のシリコンに、体毛に見立てた光ファイバを等間隔に刺したものである。光ファイバは大気と水の密度差によって水面で駆動され、触覚拡大機構によって皮膚表面、及び内部の受容器によって知覚できる大きさの力まで変換される。光ファイバの駆動を妨げないようにするため、光ファイバの“毛根”部分には空間を設け、外界からの刺激の伝達を妨げないようにしてある。(図 5) シート状のシリコン(土台)の厚みは約  $3.3 \text{ mm}$ 、光ファイバの長さは約  $84 \text{ mm}$  であるため、 $\alpha$  はおよそ 24 である。光ファイバを剛体と仮定したとき増幅率は 24 倍となる。

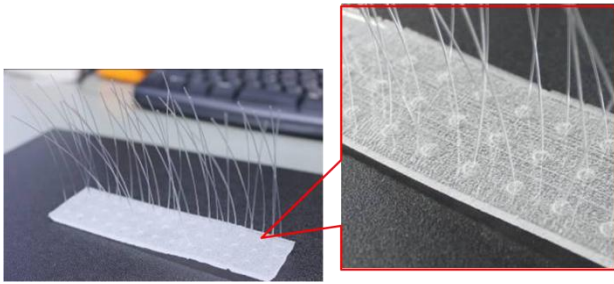


図 4. 実験装置とその拡大図

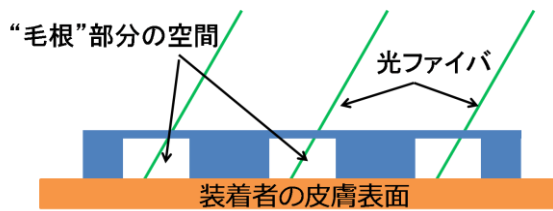


図 5. 装置の断面図

### 3.2. 実験方法

試作装置をベルクロテープで装着した皮膚と素手での水面知覚比較実験を行った。シート状のシリコン自体が水面の知覚に影響を及ぼす可能性を考慮し、被験者にはシリコンシート、本装置、素手の3条件について評価実験を行った。評価はシリコンシート装着時を基準刺激として、計4試行を行い、素手と装置について水面知覚を評価した(表 1)。

実験は被験者 21 歳から 25 歳までの男女 14 名について行った。実験作業の順番の違いによる感覚の偏りを考慮して、実験手順の順番を2通り用意し、被験者をAグループ(7名)とBグループ(7名)に分割した。Aグループは表 1 で述べた手順に基づき実験を行い(図 6)、Bグループは表 1 の試行を左右の腕を入れ替えて同一手順で実施した。

先行研究より、水面知覚は水温が皮膚表面の温度と同程度(34℃付近)の時に一番知覚されやすい事が知られているため、34℃に保った水道水を用意して、実験に使用した。以下に実験手順を示す。

腕を水中に浸し水面の明瞭さを回答するまでを1試行と定義した。各試行内では、視覚から得た事前知識によるバイアスを取り除くため、被験者の目を閉じさせた。その後被験者は実験者の指示に応じて、基準となる腕と評価を行う腕とを同時に水中に浸させた。温度統制を行うために各試行前にそのまま 30 秒間腕を浸させた。被験者にあらかじめ設問内容を把握させるため、この時間を利用し設問を2度読み上げた。

温度統制の後、被験者はメトロノーム(60拍毎分)に合わせて腕を10往復上下運動させた。一回の試行が終わ

るたびに装置が被験者の目に入らないよう遮蔽板を用いて被験者の腕を隠した後、基準刺激に対する相対的な鮮明さを図 7 に示したアナログスケール内に線分で記入させた。

回答終了後、再び被験者に目を閉じさせた後、次の試行に備えて装置の付け替えを行った。この試行を繰り返し、1名あたり合計4試行を実施した。

表 1. 試行手順例(Aグループ)

試行番号	左前腕	右前腕
1	シリコンシート	素手
2	シリコンシート	提案装置
3	素手	シリコンシート
4	提案装置	シリコンシート

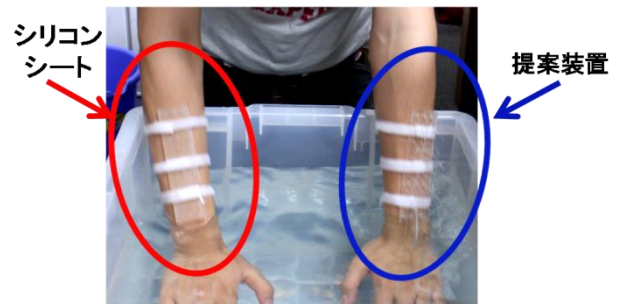


図 6. 実験の様子

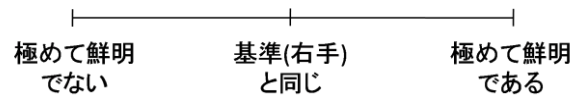


図 7. 実験で用いたビジュアルアナログスケール

### 3.3. 実験結果

統計解析を行うため、アナログスケールを基準0で正規化した。

A, B 群間で平均値に有意な差があるとはいえなかったため、A, B 群の値を平均化して一つにまとめ、その結果を図 8 に示す。装置を腕に装着した時の鮮明さは素肌の時と比べて大幅に向上した ( $t(12)=5.279, p<0.01$ )。

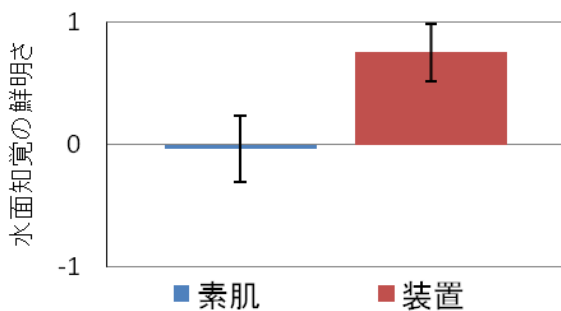


図 8. 被験者の回答した水面知覚の鮮明さ (群間平均)

## 4. 考察

### 4.1. 実験結果の考察

実験の結果、体毛一毛包受容器を模した触覚増強機構によって、水面をより鮮明に知覚することが可能であることが判明した。実験に参加した全 14 名の被験者のうち全員が、素肌で水面の知覚の鮮明さを比較した時よりも、装置を装着して水面の知覚の鮮明さを比較した時の方が水面の知覚の鮮明さが向上したと答えており、本装置を用いることで、全員が水面知覚の増大を知覚することができたと言える。

また、被験者の内観報告のうち、装置装着時の水面の知覚の鮮明さが、次の条件の時に変化したという報告が複数得られた。具体的には、腕を水面に入れるときに比べて腕を水面から引き抜くときにより鮮明に水面を知覚したと回答した。これは、今回の実験に用いた光ファイバが、大気と水面の密度差による抵抗によって駆動されたことに加えて、腕を水面から引き抜く際に光ファイバに生じた水の表面張力によって、駆動される力が増したためだと思われる。

水面から手を引き抜く際に鮮明さが増した原因として、今回の実験では、表面張力の働く対象が実際の体毛ではなく光ファイバであり、両者のスケールが異なったため、過去の知見と異なり、表面張力の寄与があったのではないかと考えることができる。

### 4.2. 装置の改良

今回行った実験によって、提案機構によって外界からの微小な力を増幅して知覚することが可能であることが判明した。力の変換をさらに効率的に行い、通常知覚不可能な力を知覚できるようにする為に、装置にいくつかの改良を行うことが考えられる。

まず考えられることは、土台であるシリコンシートの素材変更である。今回は被験者全員の腕の湾曲にフィット可能な装置を作る都合上、人工体毛を植える土台部分を柔軟性があるシリコンで製作した。これにより腕の湾曲の度合いに合わせて装置をフィットさせることができたが、光ファイバを固定する支点部分にも柔軟性が生じ、光ファイバを通じて伝達されてきた外界からの力の一部分を吸収してしまった可能性がある。今後は使用者の腕の湾曲に合わせてフィットさせられる柔軟性を保ちながら、人工体毛を固定する支点部分では剛性を確保し、エネルギーの伝達効率を向上できるように、土台を改良することが必要だと考えられる。

同様に、人工体毛として用いた光ファイバも素材変更を検討する必要がある。今回行った実験を通して、光ファイバが外界からの力によって湾曲し、力の一部を吸収するということが観察された。その為、今後はさらに剛性の高い素材を人工体毛として使用することが考えられる。

## 5. おわりに

本論文では、提案した触覚増強機構が外界からの力の増幅能力を持つことを検証するために、水面知覚の鮮明度を基準に装置を評価した。その結果、提案した機構を用いることで素肌の状態よりも水面の知覚が鮮明になることがわかった。

今後の展望として、微風・気圧の変化・温度変化などのセンシングに特化した人工体毛を製作し、用途別の人工体毛を単一の土台に組み込むことで複数の触覚を増幅することのできる機構を製作できると考えている。

## 参考文献

- [1] Ryo Kikuuwe, Akihito Sano, Hiromi Mochiyama, and Naoyuki Takesue, Touch Technology Laboratory Funded By Toyota, Nagoya Institute of Technology and Hideo Fujimoto : Enhancing Haptic Detection of Surface Undulation, ACM Transactions on Applied Perceptions, Vol. 2, No. 1, pp. 46-67, 2005.
- [2] Michi Sato, Jyunya Miyake, Yuki Hashimoto, Hiroyuki Kajimoto : Tactile Perception of a Water Surface - Contributions of Surface Tension and Skin Hair, EuroHaptics2010, Vol. 2, pp. 58-64, 2010.
- [3] 大山 正 他 : 新編 感覚・知覚 心理学ハンドブック, 誠真書房, p.1228, 1997.
- [4] 前野 隆司 : 触覚のモデリングと有限要素解析, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 9, No. 2, pp. 72-76, 2004.