



背部にひずみ分布を提示する回転接触子アレイの基礎的検討

Basic Study of Rotating Tactile Array Presenting Strain Distribution on Back Skin

堀江新¹⁾, 稲見昌彦²⁾

Arata HORIE and Masahiko INAMI

1) 東京大学 工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, arata.horie@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学 先端科学技術研究センター

概要: 本稿では背部への力覚提示を目的とした分布型力覚ディスプレイを提案し, 基礎的な知覚実験を行う。高い臨場感をもつ体験を実現する上で, 力触覚を再現することは重要な役割を果たす。特に, 背部や臀部などの身体の大面積への力触覚提示は, 自己運動感覚などの空間的な認知に影響を与えることが明らかになっている。一方で, 既存手法で身体の大面積に提示できる力の方向の自由度や解像度は限定的であった。本研究では背部に対して力が加わった際のひずみエネルギー密度分布の再現を目的とした, 回転接触子によるアレイ型ディスプレイを提案する。また, 基礎的な検討として, 回転接触子が回転する方向と, 回転した接触子の数についての知覚実験を行なった。その結果, 接触子が単一か複数かの識別はできる傾向があることが分かり, 背部の接触子の回転方向を識別することは難しいということも明らかになった。

キーワード: 力覚ディスプレイ, スキンストレッチ

1. 緒言

バーチャルリアリティやテレプレゼンスなどを始めとした高臨場体験を実現する上で, 力触覚提示を行うことは現実感を高めるために重要な要素である。力触覚の研究領域は手部が主な研究の対象とされているが, 臀部や背部などの身体の大面積を占める部位に対する力触覚提示も提案されてきた。

これまで, 身体の大面積に対する力触覚提示として, 振動刺激による手法が数多く提案されてきた。Ali らは, 背部にアレイ状に配置した振動子による触覚提示を提案している [1]。また, 花光らは全身に振動子を配置した触覚ディスプレイによって, 高い臨場感の体験を実現している [2]。

また, 近年は臀部や背部に対して力の提示を行う手法も提案されている。著者はこれまで臀部に皮膚のせん断変形を提示し力の提示を行うことで, 全身の運動としての自己運動感覚に影響を与えることを示した [3]。また, 空気圧アクチュエータを用いて上半身の部位ごとに圧力を提示する手法 [4] も提案されており, 全身への接触を伴う体験や, 自身の身体の変容に伴う感覚に影響を与えることが明らかになっている。このように身体の大面積に対する力覚提示は, 自己運動や全身の力触覚を伴う体験の臨場感を向上させる可能性がある。

手部への力覚提示に用いられる指腹部を刺激する手法に対して, 上述したような身体の大面積に対する力覚提示手法が再現できる自由度と解像度は限定的である。指腹部であれば, ひずみエネルギー密度 (SED: Strain Energy Density)



図 1: 提案する回転接触子アレイの外観

の分布や圧力分布に基づいた分布刺激を提示することによって, 単一の刺激素子が刺激する方向に依らずに, 様々な方向への力覚を生成することに成功している [5, 6, 7]。このような分布刺激の手法が背部や臀部に適用されることによって, より高い自由度, 解像度の力覚を身体の大面積で実現できる可能性があり, 体験の質的向上が期待できる。

一方で, 背部や臀部に対する力覚提示は指腹部とは異なり, 接触子と皮膚との力の伝達は衣服を介することが前提となる。したがって, 吸引圧や電気刺激のような分布刺激手法はそのまま適用することはできず, 衣服の上からでも力を伝達することができる新たな分布刺激手法を適用する必要がある。

そこで本研究では, 皮膚を捻る回転の変形を刺激の最小単位とした背部へのひずみ分布提示ディスプレイを提案す

る。背部が安定して接触しており十分な面圧を得られる条件において、刺激点付近の SED を高めることができると考えられる。また、その刺激手法の基礎的な評価の一つとして、人が背部で回転する接触子の回転方向および接触子の数の識別に関する実験を行う。

2. 原理

2.1 皮膚の回転刺激による力覚提示

本研究では皮膚の回転による刺激を、SED の励起を目的として採用する。

これまで、回転の力のベクトルを直接再現するために皮膚を捻る刺激を提示する手法が提案されてきた。Jason らは腕部に装着する回転式のスキストレッチデバイスによる力覚提示手法を提案している [8]。また、Yoshida らも腕部に装着することを想定したデバイスとして、回転方向も提示できるデバイスを提案している [9]。

それに対し、本研究での回転刺激は捻りそのものの方向を提示する目的ではなく、刺激点付近の SED を励起させる目的で利用する。これまで指腹部で行われてきた SED 分布の再現や圧力分布の再現に関する研究の知見に基づけば、刺激素子単体の刺激方向に依らず、多くの自由度に対して力を再現できる可能性が高い。

2.2 回転接触子アレイ

提案するデバイスのプロトタイプを図 1 に示す。デバイスは 24 個の接触子から構成されており、横 4 個、縦 6 個の配置である。接触子同士の中心間の距離は 55 mm である。背部は平面ではなく、緩やかな曲面を描くため、背部の左右の接触子が中央に向かって傾斜するようマウントを調整した。

接触子に使用する素材は硬すぎると体に馴染まず、接触子のエッジによる痛みや、接触子と衣服との間で滑りが生じやすくなる。また、柔らかすぎると回転の力を伝えるにくくなる。これらの特徴を考慮し、接触子はアスカー C25 のクロロプレングムスポンジを使用する。形状は円形であり、径は 20 mm、厚さは 5 mm である。

各アクチュエータは小型のサーボモータ (ES08 MA II, YIN YAN MODEL LTD) を使用し、出力可能な最大のトルクは $0.2\text{N}\cdot\text{m}$ である。このトルクは背部の皮膚の変形に十分なトルクである。モータの回転速度の最大値は 600deg/s であり、実験はこの速度内でモータが駆動するよう信号を生成する。

各サーボモータの回転角は PC 側で動的に回転角を決定し、制御を行なう。まず、PC からマイコン (Arduino UNO, Arduino.cc) に各サーボモータの回転角の指示値がシリアル通信で送られる。I2C 通信によってマイコンから 2 つの PWM コントローラ (16-Channel 12-bit PWM/Servo Driver, Adafruit) に PWM の値が送られ、PWM コントローラから各サーボモータに PWM 信号が送られた。

デバイスは多数の接触子を搭載しているが、本稿では特に接触状態が安定していた中央部付近に位置する 2 つの接

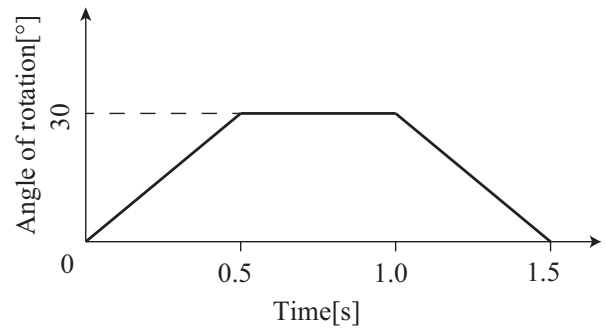


図 2: 実験で用いる接触子の回転角と時間との関係

表 1: 実験で用いる刺激の組み合わせ

A	B	C	D	E	F

触子を用いて実験を行なった。

3. 実験

3.1 実験目的

回転刺激は接触子付近の SED を高めることが期待できる。一方で、背部への回転刺激に対する知覚については明らかになっておらず、調査する必要がある。

そこで本実験は、上述したデバイスを用いて提示した背部への回転刺激に対する基礎的な調査の一つとして、被験者が回転方向や回転接触子の数をどの程度識別できるかを検証する。

3.2 参加者

健康で背部に皮膚疾患を持たない 22~26 歳の著者を含む男子学生 5 名を対象とした。

3.3 刺激

本実験で用いる接触子の回転角度の時系列変化は全て図 2 に示すプロファイルで制御した。本実験では回転角度 30deg 、および回転速度 60deg/s をパラメータとして設定した。予備的な検証により、これらの条件では回転による力を知覚できることが確認されている。目標の角度まで 0.5s で到達し、 0.5s の間その回転角を保ち、 0.5s で初期角度に戻る。

表 1 に刺激の種類を示す。刺激は単一の接触子の回転、あるいは複数の接触子の回転によるものである。各回転接触子の回転方向と数を条件とし、合計で 6 種類の刺激とした。

刺激を提示するのはデバイス中央付近に位置する接触子 2 つであり、他の接触子は動かないよう制御した。

3.4 方法

装置を椅子の背面に固定し、座面を 10deg 傾けた状態で保持する。これにより背部への接触状態が安定し、一定以上の面圧が加わった状態を保持することが可能である。参加者は T シャツ 1 枚を着用した状態でデバイスの接触子に背部を接触させ、着座した。面圧測定シート (BIG-MAT2000P3BS,

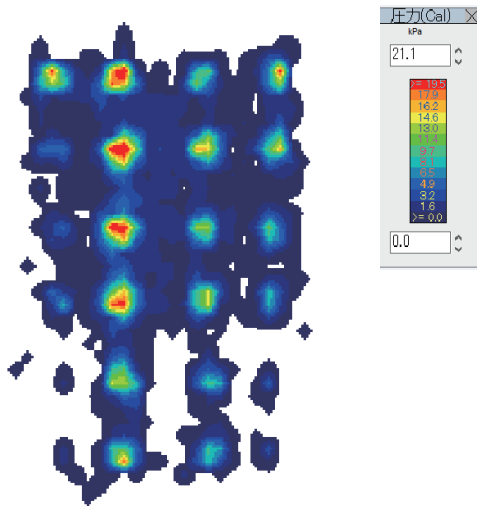


図 3: 回転接触子アレイに背部を接触させた際の圧力分布

Nitta Corp) を用いて接触子に圧力がかかっていることを確認した後、シートを取り除き、被験者は同じ姿勢を保持した。測定した圧力分布の一例を図 3 に示す。圧力のピークが見られる点が接触子が適切に接触している箇所である。本実験では特に接触が安定していた中央右寄り上から 2 つ目と 3 つ目の接触子を使用することとした。

参加者はノイズキャンセリングヘッドホンを装着し、聴覚刺激を遮断した上で以降の実験を行なった。背部に刺激が提示され、参加者は知覚した感覚から刺激を推定し、回答を行なった。回答はディスプレイに表示された表 1 の各刺激に対応したアルファベットをキーボードに入力することによって行い、次の刺激に移行した。刺激は各刺激 5 回ずつランダムな順序で提示し、計 30 回の試行を行なった。実験時間は 1 人あたり 10 分であった。

3.5 結果

実験結果の混合行列を図 4 に示す。全体の精度の平均は 0.21 であり、再現率は 0.22 であった。また F 値は 0.20 であった。これらは本実験の刺激のセットを正確に識別することは困難であるという結果であると言える。

回転方向の違いの識別は、特に刺激 A と刺激 B について着目すると明らかに方向を混同しており、識別は難しいことが示唆された。

単一接触子による刺激と複数接触子による刺激との間での識別に着目すると、精度は 0.75 であった。さらに図 4 から、特に単一接触子の回転刺激に対して複数接触子の刺激であると回答する割合が低いことが分かる。

被験者が刺激 A および刺激 C と回答している数が他の刺激と比較して多く、これら 2 つは回転する接触子の数は異なるが、回転方向がいずれも時計回りの刺激であった。

4. 考察

単一の接触子の回転方向を識別できないのは、接触子周りに生じるひずみの分布が似通っていたためである可能性が高い。均質な皮膚に十分な接触が得られている条件にお

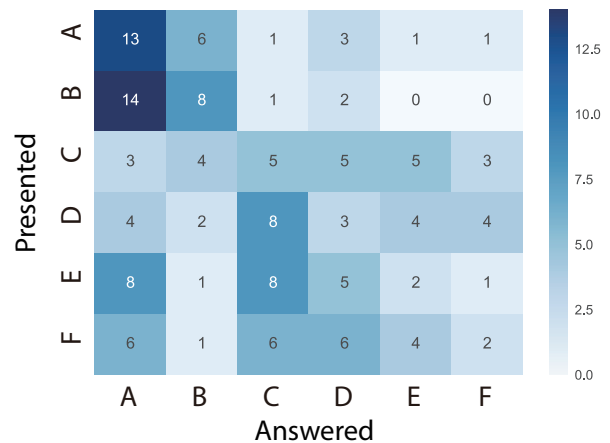


図 4: 実験結果

いて、単一の接触子が回転する場合は回転方向に依らず、皮膚に生じるひずみの大きさの分布は等しくなる。我々は生じたひずみによるエネルギーによって皮膚感覚を得ていることから、回転方向の知覚は難しかったと考えられる。

回転する接触子の数に対する回答の精度が高く、ヒトは接触子が回転した際にその動いた接触子の数の違いを識別できることが示唆されている。これは 1 点での刺激と 2 点での刺激では生じるひずみの分布が大きく異なり、その差を知覚できるからであると考えられる。回転接触子同士の距離は背部の二点弁別閾に近い値であったものの、伝播したひずみによって受容器が発火することで、1 点と 2 点とは異なる知覚が得られたと考えられる。

時計回りの刺激であると推定した回答が多いという結果については、本実験で用いた刺激が背部右側であったことが、何らかの影響を及ぼしている可能性がある。今後、背部左側についても同様の調査を行い、再現性が得られるかを検証した上でその機序を解明する必要がある。

5. 結言

本稿では、背部へのひずみ分布提示を目的とした回転接触子アレイを提案し、それを用いた基礎的な知覚実験を行った。回転接触子アレイは計 24 個の回転接触子から成る力覚提示デバイスであり、既存の椅子に装着して使用可能なデバイスであった。背部の回転刺激に対する知覚に関する実験は、接触子の回転の方向と、回転した接触子の数を識別できるかを調査する実験であった。実験の結果、実験参加者は接触子の回転方向を識別することが出来ないことが示唆された。また、回転した接触子の数については、回転した接触子の数が 1 つか 2 つかを比較的高い精度で識別できることが明らかになった。今後は左の背部についても同様の検証を行い、回答の傾向について再現性が得られるかの調査を行う。また、背部の皮膚に回転刺激を提示した際の変形の解析を進めるとともに、回答の傾向がひずみの分布に合致している事を確認する。

謝辞 本研究は JST ERATO JPMJER1701, の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Ali Israr and Ivan Poupyrev. Tactile brush: drawing on skin with a tactile grid display. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 2019–2028. ACM, 2011.
- [2] Yukari Konishi, Nobuhisa Hanamitsu, Benjamin Outram, Kouta Minamizawa, Tetsuya Mizuguchi, and Ayahiko Sato. Synesthesia suit: the full body immersive experience. In *ACM SIGGRAPH 2016 VR Village*, page 20. ACM, 2016.
- [3] Arata Horie, Hikaru Nagano, Masashi Konyo, and Satoshi Tadokoro. Buttock skin stretch: Inducing shear force perception and acceleration illusion on self-motion perception. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 135–147. Springer, 2018.
- [4] Alexandra Delazio, Ken Nakagaki, Roberta L Klatzky, Scott E Hudson, Jill Fain Lehman, and Alanson P Sample. Force jacket: Pneumatically-actuated jacket for embodied haptic experiences. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, page 320. ACM, 2018.
- [5] Daiki Maemori, Lope Ben Porquis, Masashi Konyo, and Satoshi Tadokoro. A multi-dof haptic representation using suction pressure stimuli on finger pads. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 285–294. Springer, 2014.
- [6] Hikaru Nagano, Kazuya Sase, Masashi Konyo, and Satoshi Tadokoro. Wearable suction haptic display with spatiotemporal stimulus distribution on a finger pad. In *2019 IEEE World Haptics Conference*, pages 389–394. IEEE, 2019.
- [7] Katsunari Sato and Susumu Tachi. Design of electro-tactile stimulation to represent distribution of force vectors. In *2010 IEEE Haptics Symposium*, pages 121–128. IEEE, 2010.
- [8] Jason Wheeler, Karlin Bark, Joan Savall, and Mark Cutkosky. Investigation of rotational skin stretch for proprioceptive feedback with application to myoelectric systems. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 18(1):58–66, 2010.
- [9] Kyle T. Yoshida, Cara M. Nunez, Sophia R. Williams, and Allison M. Okamura. 3-dof wearable, pneumatic haptic device to deliver normal, shear, vibration, and torsion feedback. In *2019 IEEE World Haptics Conference*, pages 97–102. IEEE, 2019.