



筐体および回転軸を皮膚に固定した DC モータを用いた振動提示 (第 3 報)

Pilot study on tactile presentation using DC motor fixed to the skin (III)

真鍋光希¹⁾, 牛山奎悟¹⁾, 高橋哲史¹⁾²⁾, 梶本裕之¹⁾

Mitsuki MANABE, Keigo USHIYAMA, Akifumi TAKAHASHI, and
Hiroyuki KAJIMOTO

- 1) 電気通信大学院 情報理工学研究所 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {manabe, ushiyama, a.takahashi, kajimoto}@kaji-lab.jp)
2) 日本学術振興会

概要: 我々はこれまで、モータの筐体と回転軸を皮膚に固定することで、振動と静的な歪を高効率に提示可能な手法を提案してきた。前報では、振動刺激の主観的な強度と消費電力を測定し、既存手法との性能比較を行ったが、比較は強度のみに留まっており、感覚の質については考慮されていなかった。本稿では提案手法の改良と感覚の質の評価について述べる。

キーワード: 小型アクチュエータ, ウェアラブルデバイス, モータ, 触覚

1. はじめに

触覚提示は通知手段やエンターテインメント体験の向上のために広く活用されている。振動提示はその代表的な手法であり、多様な感触を再現できることから様々なモバイル機器やウェアラブル機器に実装されている。

従来の振動子では、振動を生成するために錘の運動する反力を用いる手法が主流であった。偏心モータは、重心がモータの回転軸上からずれた偏心錘を回転することにより、順次全方向に向きを変える遠心力を用いて振動を生み出す。ボイスコイルをはじめとする直動型振動子は、直線状に往復する錘の反力を用いて振動提示をする[1]。そのため偏心モータと異なり周波数と振幅を独立に制御可能である。また、DC モータを往復するように駆動することで振動提示を行う提案もある[2]。こうした錘の往復運動する反力で振動を生み出す手法において強い力を出すためには、錘の質量と加速のための電力を増加させる必要があるため装置の重量化及び消費電力の増加が避けられない。

これに対し、アクチュエータの基部と出力部を両方皮膚に固定し、錘の反力に依存せず振動を提示する手法がいくつか提案されてきた。Shull らはリニアモータを皮膚に貼り付け、マグネットがついたベースを無可動の基部としてコイルのタクタによる皮膚伸張を行うことで、効果的に振動提示を行うことを提案した[3]。また Precchayasomboon らは、手持ちデバイスにアクチュエー

タを組み込むことで、把持された筐体を基部とし手のひらや指に皮膚牽引と振動提示を行う提案をしている[4]。この提案では、タクタは一点であり、直線上に動く。

筆者らは前報で、図 1 のようにモータの筐体と回転軸双方を皮膚に装着する振動子を提案した[5]。この提案では、基部と出力部の形状と配置がほぼ対称であるため、互い違いに動く二点の出力部でせん断方向の皮膚牽引をしているといえる。周波数特性の計測、主観的強度と消費電力の関係について、回転軸を固定しない手法[2]と比較したところ基部と出力部を両方皮膚に固定する手法は、錘に依存せず振動を生みだせるため、軽量ながら省電力で強い振動刺激を生成可能であること、特に低周波領域で有利であることを示した。

しかしながら、既存の振動提示手法はすべて接触位置が一点であったのに対し、本手法では二か所になり、機械的な皮膚変形の仕方の違いにより生起する振動の質

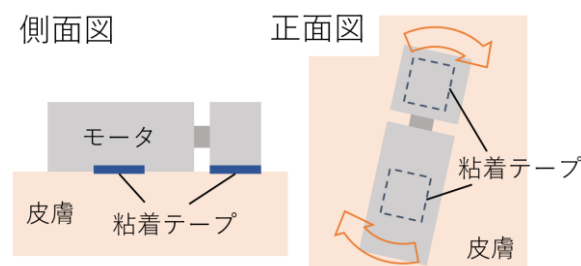


図 1 提案の概要

が異なることが考えられる。そこで本稿では、二点の出力部によってせん断変形成分を含む振動提示をした際の、既存の直動型振動子に対する感覚の質の違いについて調査した。

2. 実験 1 主観的周波数の評価

周波数知覚は最も基本的な触知覚の一つであり、数多くの研究が周波数弁別能力の調査を行っている[6][7]。振幅や周波数を変えた振動提示と機械受容器の応答回数との関係に関する調査によれば[8]、速応性の機械受容器はある程度の振幅の振幅が与えられると一周期の皮膚変形の中で一回活動し、振幅が大きくなると一周期中での活動回数が数回に及ぶことがあることが報告されている。こうした観察から周波数知覚は受容器活動と対応づけることが可能と考えられる。一方で空間的に影響し合う場合があることも知られている。皮膚上の二点に逆位相の振動を与え、二点間の距離に応じて二点の低周波振動または一点の高周波振動に感じられる閾値を調査した研究では[9]、二点の距離が近いと一点の高周波振動に感じられること、二点間の距離がいわゆる二点弁別の距離より離れていても周波数知覚の変化が生じる事が判明している。

本提案手法は、「二点で皮膚せん断を伴う振動提示」、「円筒形モータによって、皮膚を巻き上げるように一周期で二度皮膚を押し込む」ことが特徴として挙げられる。このことにより、従来の皮膚を垂直、水平に変形させる振動子と提案手法では、知覚される周波数が異なる可能性がある。具体的には、提案手法は一周期に二度皮膚を垂直に変形させることにより、周波数を倍に感じられる可能性が考えられる。

本実験では、調整法により主観的な振動周波数の等価点を調査する実験を行った。

2.1 実験セットアップ

実験では、ソフトウェア (Processing) により各周波数の正弦波を生成し、アンプで増幅し、本手法で用いる DC モータ、及び既存の振動子(アルプス電気製、フォースリアクタ)を駆動した。フォースリアクタは板バネに固定された錘が筐体の最も広範な側面に対して直動する振動子である。使用したアンプはステレオパワーアンプ(FX-AUDIO- FX202A/ FX-36A PRO)であり、基準刺激用と調整対象用で二つ用意した。使用した DC モータは、Maxon Motor 349192 (DC motor RE 6 Ø6 mm, 貴金属ブラシ, 0.3 Watt, 6V) であった。重量は筐体側 (モータ込み) で 2.46g、回転軸側で 0.56g であった。粘着剤には皮膚に張り付ける用途の医療用テープ(3M 製, 1522H)を用いた。

2.2 実験条件

本実験は、5名 (23~27 歳, 右利き, 男性) を対象に実験を行った。周波数を調整の対象とした。手法の条件は図 2 に示す (a), (b), (c) の三種類とした。(a)は皮膚に垂直な振動, (b)は皮膚に水平な振動, (c)は提案手法の 2 点のせん断成分と円筒形モータの巻き上げるような垂直方向の

牽引成分が含まれる接線方向の振動である。粘着テープの面積は合計で $5 \times 10 \text{mm}$ となるようにした。手法 (a) を基準刺激とし、交流電圧振幅は常に 4V になるようにした。振動子の装着位置は、振動の質を鮮明に感じられるように人差し指の腹とし、モータの回転軸側が指先側に向くようにした。測定を組み合わせた表 1 のように 3 種類とした。(a, a) は左右の手の指で刺激の知覚強度が異なっていないか調べるための組み合わせであった。どの組み合わせに関しても左手の人差し指に付けた方を基準刺激に、右手指に付けた方を調整対象にした。周波数条件は、印加電圧を一定としたときにフォースリアクタが発熱、または筐体と錘が接触しないようなレンジにするため、予備実験より 30Hz, 75Hz, 120Hz の 3 種類を選んだ。

2.3 実験手順

振動子を左右の手の人差し指に異なる手法で装着し (一方が基準刺激(a), もう一方が調整対象), 基準刺激と刺激強度が同等になるように被験者に周波数を調整させ、一致した際の調整対象の方の周波数を記録した。周波数を調整するために図 3 のように二つのエンコーダを用意し、

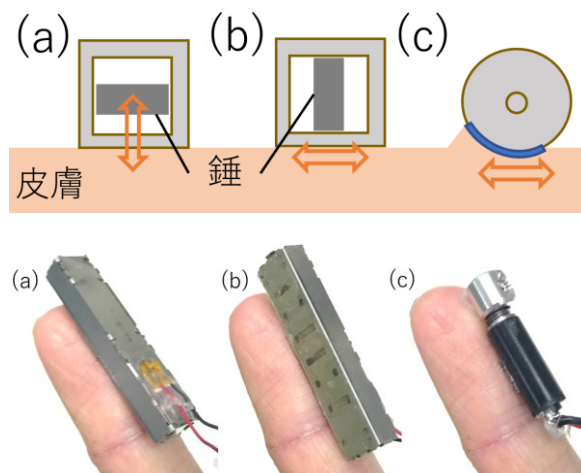


図 2 各条件の振動子 (上) 概要図 (下) 実物

表 1 条件の組み合わせ

(左手(基準), 右手)	(a, a)	(a, b)	(a, c)
--------------	--------	--------	--------

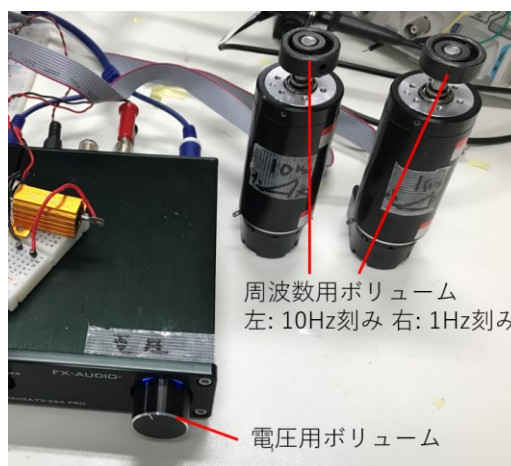


図 3 実験のセットアップ

片方は 10Hz 刻み、もう一方は 1Hz 刻みで変化するようにした。この際、周波数を変えるたびに共振の影響により振幅が変化する。そのため被験者に、あくまで一致させる対象は周波数であることを伝え、識別しやすいようにアンプのボリュームを回すことで自由に調整対象の電圧を調整するように指示した。手法 3 種類の組み合わせごとに三種類の周波数を一回ずつ、計九回測定を行った。配置の組み合わせの順番と周波数の提示順はランダムに設定した。実験の様子を図 4 に示す。被験者は実験中、イヤーマフを装着していた。振動は、左右の指に交互に二秒提示一秒停止のループを繰り返すように提示した。振動提示している間は、被験者は腕を机に置き閉眼し触覚刺激のみに集中するようにし、動が停止している間に目を開き振幅と周波数の調整を行うよう指示した。一回の測定の調整の回数に制限は設けなかった。

2.4 結果

各被験者の結果を平均と標準偏差は図 5 のようになった。基準刺激 (a) 同士の組み合わせを見ると、左右の手指の感覚の差はほぼないとわかった。どの周波数においても、振動子の違いによる主観的周波数の大きな変化は見られなかった。

3. 実験 2 振動感覚の要因分析

実験 2 では、SD 法を用いて振動子の種類による振動感覚の違いの有無と要因を調査した。同じ周波数、同じ主観的振動強度における感覚の質の違いについてリッカート尺度で答えさせた。

3.1 実験条件および手順

実験 2 は実験 1 と並行して実施されたため、実験セットアップに関しては同様であった。被験者は実験 1 と同一の 5 名で行った。振動の触覚感度の分析に関する先行研究[10]を参考に、参加者が答える感覚の質の項目を決めた。表 2 に示す項目について、7 段階で 1~7 の値で回答させた。

実験では、左右の人差し指の振動子に同じ周波数の交流を印加し、はじめに被験者に左人差し指の基準振動子と同じ刺激強度に感じられるように右人差し指の対象振



図 4 実験の様子

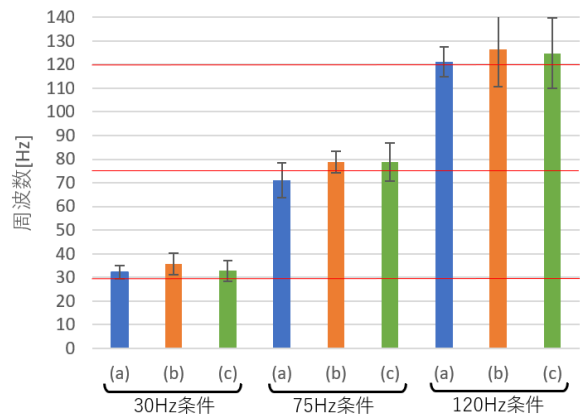


図 5 各周波数における主観的周波数

表 2 感覚の尺度

尺度
穏やかな 1-激しい 7
細かい 1-粗い 7
ぼやけた 1-鮮明な 7
不快な 1-心地よい 7
不自然な 1-自然な 7
狭い 1-広い 7

動子に印加される電圧振幅をボリュームで調整させた。調整後、基準刺激を 4 としたときの対象となる振動の尺度を口頭で答えさせた。手法三種類の組み合わせごとに三種類の周波数を一回ずつ、計九回測定を行った。

3.2 結果

周波数ごとの結果は図 6 のようになった。基準刺激 (a) 同士の条件を見ると、どの周波数においても左右の手指の感覚の差はほぼないと判明した。30Hz の低周波においては、提案手法 (c) は特に激しさ、鮮明さの項目が大きかった。75Hz 以上から提案手法 (c) の振動を狭く感じる参加者と、120Hz になると条件 (a) (b) を粗く感じる参加者が多かった。

4. 考察

実験 1 に関して、提案手法は一周期に二度、円筒形モータによって巻き上げるような垂直方向の皮膚変形が発生することで、実際より倍の周波数に感じられるという仮説を立てたが、いずれの周波数でも振動子条件間で明確な差はなかった。一つの原因としては、指先の二点弁別閾が 1~2mm 程度であるのに対して、今回提案手法のテープ間の距離はそれより大きい 5mm であったため、空間的に異なる場所での刺激が周波数知覚として混じらなかった可能性が考えられる[11]。いずれにしても、提案手法が従来手法とほぼ同等の周波数知覚を生じさせることは実用上好ましい結果であったと言える。

実験 2 に関して、低周波において提案手法が激しく鮮明に感じられる理由としては、同じ角速度であれば低周波の方が振幅は大きくなり、皮膚牽引のストロークが長くなるためせん断成分の増加したことが原因と考えられ

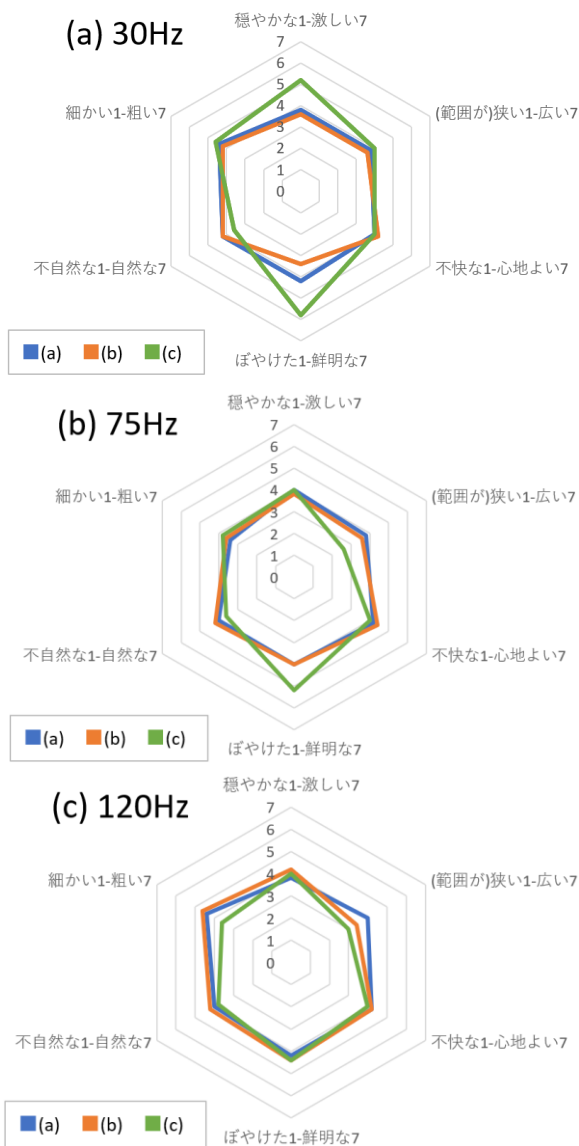


図 6 周波数ごとの感覚

(a) 30Hz 条件, (b) 75Hz 条件, (c) 120Hz 条件

る。また皮膚牽引のストロークが長くなった結果として、皮膚変形が歪を生じ、高調波成分を生じていた可能性も考えられる。120Hzになると条件 (a) (b) を粗く感じる参加者が多かった理由としては、今回の実験では、電圧調整中にフォースリアクタの振幅を大きくしすぎた場合に錘と筐体の衝突によるノイズが発生してしまったことが原因と考えられる。

5. おわりに

本研究では前報に引き続き、DC モータの筐体・回転軸の両方を皮膚に固定することで、せん断成分を含む振動を皮膚に提示可能な手法について評価した。前報まではエネルギー効率や刺激強度の評価を行ったのに対し、今回は振動の主観的な質について調査した。その結果、周波数の感覚は一般的な振動子と同様であることがわかった。また提案手法は低周波において振動を激しく鮮明に感じ、高周波であれば狭く感じる傾向があると判明した。

今後は、実験条件の統制について改善する。また被験者を増やすことで十分なデータを得る。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20K20627 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Y. Yao and V. Hayward, "Design and analysis of a recoil-type vibrotactile transducer" J Acoustical Society of America, vol. 128, pp.619-627, 2010
- [2] V. Yem, R. Okazaki, and H. Kajimoto, "Vibrotactile and Pseudo Force Presentation using Motor Rotational Acceleration," Haptics Symposium '16, pp. 47-51, 2016
- [3] P. Shull, T. Tan, H. Culbertson, X. Zhu, A. Okamura "Resonant Frequency Skin Stretch for Wearable Haptics", IEEE Transactions on Haptics, vol: 12 (3) pp: 247-256, 2019
- [4] P. Preechayasomboon, A. Israr, M. Samad, "Chasm: A Screw Based Expressive Compact Haptic Actuator", CHI '20: Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human factors in Computing Systems, pp. 1-13, 2020
- [5] 真鍋光希, 牛山奎悟, 高橋哲史, 梶本裕之, 筐体および回転軸を皮膚に固定した DC モータを用いた振動提示 (第 2 報), 第 21 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2020.
- [6] LaMotte RH, Mountcastle VB. Capacities of humans and monkeys to discriminate vibratory stimuli of different frequency and amplitude: a correlation between neural events and psychological measurements. J Neurophysiol 38: 539-559, 1975.
- [7] Harris JA, Arabzadeh E, Fairhall AL, Benito C, Diamond ME. Factors affecting frequency discrimination of vibrotactile stimuli: implications for cortical encoding. PLoS ONE 1: e100, 2006.
- [8] W H Talbot, I Darian-Smith, H H Kornhuber, V B Mountcastle, "The sense of flutter-vibration: comparison of the human capacity with response patterns of mechanoreceptive afferents from the monkey hand", Journal of Neurophysiology, Vol. 31, No. 2, 1968
- [9] S. McIntyre, I. Birznieks, R. Andersson, G. Dicander, P. P Breen and R. M Vickery, "Temporal Integration of Tactile Inputs from Multiple Sites", International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, 2016
- [10] 宮村 淳史, 小林 義和, 白井 健二, 振動波形パラメータの変化による触覚感度の分析, 2004 年度精密工学会春季大会, pp. 229-230, 2004
- [11] E. R. Kandel, J. Schwartz, and T. Jessell, カンデル神経科学, Principles of Neural Science Fifth Edition. 2014.