



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

Vibration presentation using a DC motor
with a housing and rotating shaft fixed to the skin

真鍋光希¹⁾, 牛山奎悟²⁾, 高橋哲史²⁾, 梶本裕之²⁾

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

- 1) 電気通信大学 情報理工学域 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, manabe@kaji-lab.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, {ushiyama, a.takahashi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要 : 従来の振動子は筐体内の錘の運動の反作用として皮膚に振動が提示されるという原理上, 皮膚を変形し続ける直流成分ないし低周波成分の提示が困難であった. 本研究では, DC モータの筐体・回転軸の両方を皮膚に固定することで, 通常の振動に加えて直流成分ないし低周波成分を皮膚に提示可能な機構を提案する.

キーワード : 振動アクチュエータ, DC モータ, ウェアラブルハプティック

1. はじめに

機械的振動は触覚提示のための代表的な手法であり, 様々な種類の振動子が提案されている. 例えば偏心モータは DC モータと錘という簡単な構成であるため広く普及した振動子である. これは重心に偏りのある錘をモータの回転軸に取り付けることで, 回転時の遠心力によって振動を生み出す. しかし, 錘の重心が固定されているため振動振幅と周波数を独立に制御できない. また十分な回転速度に達するのに時間を要し応答性が悪い. 以上の結果として高品位な触覚提示に向かないという原理的な課題がある.

ボイスコイルアクチュエータのような錘が直線状に往復することで振動を生み出すアクチュエータ(以下直動型振動子)は, 応答性が高く高品位な触覚提示に用いられている. しかし, 振動する錘をバネで筐体と接続する構造上, 周波数特性が平坦ではなく多くの場合強い共振特性を持つ. また低周波かつ大振幅の振動を提示しようとするとき錘が移動する分の空間が必要であり, 筐体の大型化が避けられない. さらに直流成分については原理的に提示できないという課題がある.

この問題に対して, DC モータの回転軸を回転させたときの反力を振動提示に利用することで周波数特性の問題を一部解決することが可能である[1]. モータのロータの回転は原理的に無限回転が可能であるから, 錘が往復運動する空間が必要な直動型振動子と比べ, 装置の大型化を避けつつ低周波の強い振動を提示可能である. また構造上バネを持たないため周波数特性が平坦になる.

本稿では, DC モータの筐体だけではなく回転軸も皮膚に固定し回転軸を往復させる手法を提案する. これにより強い振動を提示でき, さらに皮膚を変形し続ける直流成分の提示も可能になると考えられる. 提案手法のプロトタイプを製作し予備的な実験を行った.

2. 関連研究

皮膚を変形し続ける直流成分を提示できる研究としては, 皮膚に粘着テープで取り付けた形状記憶合金で皮膚伸張を行う提案[2]や, ラテックスチューブに水を流し触覚提示を行う提案[3]などが試みられている. ただしこれらの提案では, 高周波の振動提示を行うことはできない.

皮膚に貼り付けたリニアモータによる皮膚伸張を用い, 効果的に振動提示をすることに成功した研究がある[4]. この提案では皮膚の共振周波数を利用するため低周波の振動で強い振動を提示できたが, 直動型振動子を用いているため低周波領域において振幅が大きくなり, 筐体の大型化が避けられない.

把持した, またはバンドで腕, 足などに固定したデバイスで振動提示や皮膚牽引を行う提案がなされている[5][6][7]. これらの提案では装置の固定は圧迫と摩擦によるものであり, 固定の安定性とそれに伴う力の伝達効率, および装着箇所に関する汎用性に課題がある.

3. 提案手法

これらの問題に対し, 本研究では DC モータで振動提示

及び皮膚牽引が可能な手法を提案する。

図 1 に提案の概要を示す。筐体及び回転軸ともに皮膚に接着した DC モータを駆動させることで、錘を固定していない直動型振動子や DC モータの往復回転の反力を利用した振動子[1]よりも強い振動を提示できる。装着の際ベルトで体に固定するのではなく粘着剤で接着するため体の設置個所に関する汎用性が高く、固定の安定性も確保できる。また、直流電圧を DC モータに印加することで皮膚へせん断力を与え継続的な皮膚変形が可能である。

提案デバイスは DC モータ、粘着剤、外装フレームから構成される。DC モータを皮膚に固定させるための粘着剤の候補としては、ヌードサンダルに用いられているような皮膚への接着用で、水にぬらすことで粘着力が復活するような粘着テープが挙げられる。またしっかりと接着できるように、皮膚との設置面が平らになるフレームを DC モータの筐体及び回転軸に装着する。

4. 実験

本実験の目的は、提案手法が回転軸を固定せず筐体のみ皮膚に張り付けた DC モータにくらべて強い振動を提示可能であることを検証することである。調整法により、6 種類の周波数における 4 種類の貼り付け手法による触覚刺激の強度の違いを比較した。

4.1 実験セットアップ

本実験では、モータドライバを用い PWM 制御で供給電力を制御し DC モータを駆動した。使用した DC モータは、Maxon Motor 144457 (DC motor RE10 EB 1.5W SL 1WE) ギア付き (gear GP10K 0.015Nm 2ST GL) であった。フレームは図 2 に示す寸法で 3D プリンタにより制作した。粘着剤には皮膚に張り付ける用途のウィッグ用テープを用いた。マイコン (ESP32) と DC ブラシモータードライバ

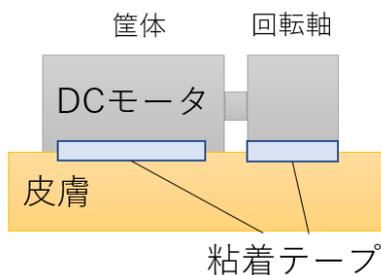


図 1 提案の概要

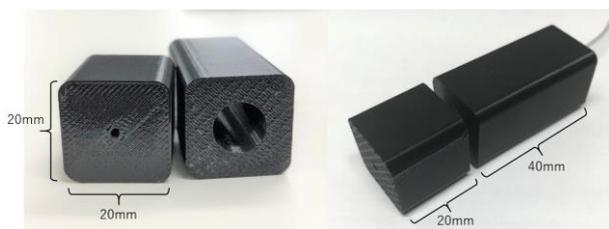


図 2 フレーム(左)

モータに装着したときの外見(右)

(BD6222HFP-TR) を用い正弦波の交流電圧を PWM 制御で供給し、DC モータを駆動した。

4.2 実験条件

本実験は COVID-19 の影響で被験者を集めるのが困難であったため、著者 1 名 (22 歳, 右利き, 男性) を対象に予備実験を行った。

本実験では PWM 制御で正弦波の交流電圧を供給するが、振幅にあたる「Duty 比の最大値」(以下ではこれを振幅と呼ぶ。すなわち振幅は 0 から 1 の値である)を調整の対象とした。モータドライバの可変設定電圧は 6V とした。PWM 制御の周波数は 30KHz, Duty 比の解像度は 11bits とした。振幅の調整間隔は予備実験より 5/2048 とした。

貼り付け方の条件は図 3 に示す (a), (b), (c), (d) の 4 種類とした。1 つの粘着テープの面積は 13×15mm とした。貼り付け手法 (a) を基準刺激とし、正弦波の振幅にあたる振幅は 0.75 とした。装着位置は前前腕部中央とした。提案手法で接着する場合は筐体が肘側に向くようにした。測定を組み合わせた表 1 のように 7 種類とした。(a, a) は左右の腕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、この組み合わせに関しては左腕に付けた方を基準刺激に、右腕に付けた方を調整対象にした。

周波数は 2Hz, 4 Hz, 8 Hz, 16 Hz, 32 Hz, 64Hz の 6 種類とした。提案手法は特に低周波の振動提示において有効であると考えられるため低い周波数を選んだ。

4.3 実験手順

DC モータを左右の腕に異なる貼り付け方の手法で装着し (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振幅を調整させ、一致した際の調整対象の方の値を記録した。

DC モータの貼り付け手法の 7 種類の組み合わせごとに 6 種類の周波数を 3 回ずつ、計 18 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。総計測数は 7 (配置の組み合わせ)×18 (各配置の試行回数)より 126 回であった。

実験の様子を図 4 に示す。被験者は実験中、椅子に座りヘッドホンでホワイトノイズを聞いていた。振動は 1 秒提

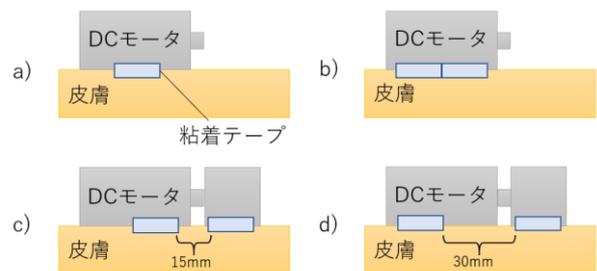


図 3 貼り付け手法

表 1 左右の腕に貼り付ける手法の組み合わせ

(左腕(基準), 右腕)	(a, a)	(a, b)	(a, c)	(a, d)
(左腕, 右腕(基準))		(b, a)	(c, a)	(d, a)

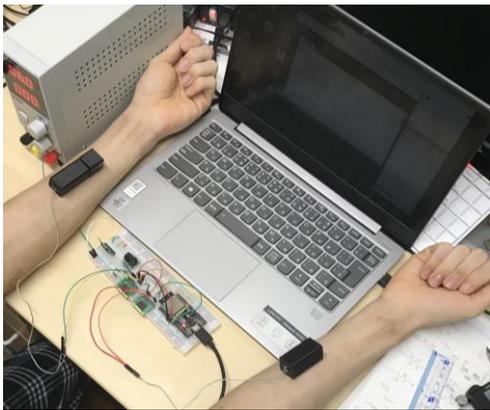


図 4 実験の様子

示 3 秒停止のループを繰り返すようにした。振動提示している間、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た。振動が停止している間被験者は目を開き振幅の調整を行った。1 回の測定の調整の回数に制限は設けなかった。被験者はキー操作で振幅調整、周波数変更、振動の一時停止、次に試行する条件の確認、記録などを行った。

周波数ごとにそれぞれの貼り付け手法について、基準刺激と同等な刺激になる振幅の、基準刺激の振幅に対する割合の平均を計算した。(a, a) に関しては 3 回分で、(a, c) と (c, a) など左右の腕で基準刺激と調整対象を入れ替えた結果に関してはそれらを合わせて 6 回分で平均をとった。

4.4 結果

結果は表 2 のようになった。手法 (a) の列を見ると、いずれの周波数においても基準刺激との振幅の差は極めて小さかった。よって被験者は左右の腕で同じように知覚できていたと言える。

各周波数における手法 (b), (c), (d) の基準刺激に対する振幅の割合のグラフは図 5 のようになる。どの周波数においても提案手法 (c), (d) の振幅は低く、提案手法が強い刺激を提示できることが示された。

提案手法は低周波の振動において、高い性能を発揮できることがわかった。振動の周波数が 2Hz のとき、基準刺激のおよそ 10 分の 1 の振幅で基準と同等の刺激を提示できた。また、2Hz, 4Hz では手法 (c) より手法 (d) の方が振幅が小さいが、8Hz, 32Hz, 64Hz では手法(d)より手法 (c) の方が小さい振幅で強い刺激を提示できていることから、周波数によって最適な筐体と回転軸の粘着剤の距離が異なることがわかった。手法 (c), (d) と粘着剤の面積が同じ手法 (b) は、基準刺激と比べ若干触覚刺激が弱くなった。

5. 考察

5.1 結果について

提案手法が低周波の振動において高い性能を発揮できた理由としては、電圧が同じであれば低周波振動の方が振幅の回転量が大きく皮膚牽引のストロークが長くなるこ

表 2 各手法の基準刺激に対する振幅の割合

	(a)	(b)	(c)	(d)
2Hz	1.0026	1.0319	0.1236	0.1106
4Hz	0.9950	1.0438	0.1340	0.1215
8Hz	0.9906	1.0405	0.1551	0.1627
16Hz	0.9950	1.0243	0.2143	0.2077
32Hz	0.9982	1.0281	0.3087	0.3754
64Hz	0.9960	1.0112	0.4296	0.4302

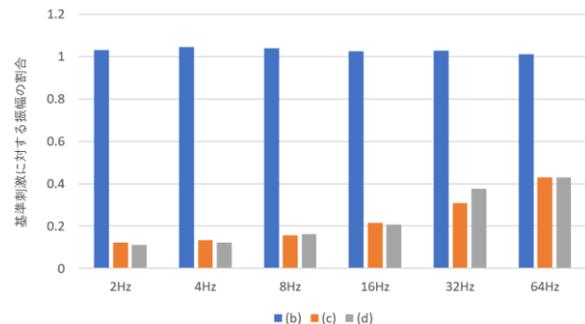


図 5 各手法の基準刺激に対する振幅の割合のグラフ

とが原因と考えた。

周波数によって最適な筐体と回転軸の粘着剤の距離が変わる理由を考察する。粘着剤間距離が近いほど筐体と回転軸の間の皮膚にかかるせん断力は強くなるが、近すぎると互い違いの方向に動く筐体と回転軸の動きを皮膚が妨げてしまい振幅が小さくなる。このトレードオフの関係により刺激提示に最適な粘着剤間距離が決まり、その値は様々なパラメータによって決まると考えられるが、その一つが周波数であると考えた。

5.2 消費電力について

本実験のリミテーションとして、提案手法では DC モータの筐体と回転軸ともに皮膚に固定するため、回転が妨げられることによってモータの逆起電力が 0 になり、電流値が増加し電力の消費が激しくなることを考慮しておらず、消費電力の観点からも提案手法が効率的かを検証する必要があることが挙げられる。

6. おわりに

本研究では、DC モータの筐体・回転軸の両方を皮膚に固定することで、強い振動と直流成分を皮膚に提示可能なウェアラブルデバイスを提案した。また知覚実験を行い手法の有効性を検証した。しかし被験者数や条件の数が少ないことでデータが不十分であるので、被験者を増やしさらなる調査をしていきたい。

今後の展望としては、消費電力の計測実験も合わせて行う予定である。また小型化など装置の改良も目指していく。

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] ヤエム ヴィボル, 岡崎 龍太, 梶本 裕之: DC モータを用いた振動提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 4, pp. 555- 564, 2016.
- [2] Al-Huda Hamdan N, Wagner A, Voelker S, Steimle J, Borchers J: Springlets: Expressive, Flexible and Silent On-Skin Tactile Interfaces, CHI '19: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, No.: 488 pp: 1-14, 2019
- [3] Han T, Anderson F, Irani P, Grossman T: HydroRing: Supporting Mixed Reality Haptics Using Liquid Flow, UIST '18: Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Vol. 4, pp. 913-925, 2018.
- [4] Shull P, Tan T, Culbertson H, Zhu X, Okamura A : Resonant Frequency Skin Stretch for Wearable Haptics, IEEE Transactions on Haptics, vol: 12 (3) pp: 247-256, 2019.
- [5] Battaglia E, Clark J, Bianchi M, Catalano M, Bicchi A, O'Malley M : The Rice Haptic Rocker: Skin stretch haptic feedback with the Pisa/IIT SoftHand, IEEE World Haptics Conference, pp: 7-12, 2017.
- [6] Bark K, Wheeler J, Shull P, Savall J, Cutkosky M : Rotational skin stretch feedback: A wearable haptic display for motion, IEEE Transactions on Haptics, vol: 3 (3) pp: 166-176, 2010.
- [7] Preechayasomboon P, Israr A, Samad M: 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