

筐体及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)

○真鍋 光希 (電気通信大学), 牛山 奎悟 (電気通信大学), 高橋 哲史 (電気通信大学),
梶本 裕之 (電気通信大学)

Vibration presentation using a DC motor

with a housing and rotating shaft fixed to the skin (II)

○Mitsuki MANABE(UEC), Keigo USHIYAMA(UEC), Akifumi TAKAHASHI(UEC),
and Hiroyuki KAJIMOTO(UEC)

Abstract: In this study, we propose a method for presenting vibration and traction by fixing both the DC motor housing and the rotation shaft to the skin. In the previous report, we found that the proposed method could present stronger vibration with smaller input than an existing method. However, the evaluation index was insufficient to discuss the effectiveness of the proposed method. Therefore, in this paper, adopting power consumption as a new evaluation index, we investigated the performance of the proposed method in detail.

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[1][2]. 振動提示はその代表的手法であるが, 中でも高品位な振動提示が可能な振動子は, 多種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, 高品位な振動を提示するために錘の往復運動を利用する手法が多く用いられてきた. 普及した例として, 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振動子(以下直動型振動子)が挙げられる[3]. しかし, 直動する錘が移動する分のスペースが筐体に必要であり, 特に低周波かつ大振幅の振動提示を行う場合筐体を大型化する必要がある. また多くの場合, 往復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強い共振特性を持つ.

DC モータの回転軸を往復に回転させ, その反力で筐体を振動させることで, これらの問題を一部解決した振動提示の提案がある[4]. 錘が往復運動するスペースが必要な直動型振動子に対し, 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ため, 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. しかし, この手法及び直動型振動子では, 錘の往復運動する作用反作用で振動を生み出しており, 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.

本稿では, Fig. 1 のように 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ことで, より強い振動を提示できる手法を提案する. 従来錘の往復運動の反力を用いる手法[4]と比べ, より効率よくモータのトルクを皮膚への振動に変換できると考えられる. また強い反力を生み出すための錘の質量が必要なくなり, 振動子の軽量化につながる. 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.

前報では, 筐体のみ皮膚に固定する従来振動提示手法と提案手法の刺激強度を調整法により比較した. 実験の結果, 提案手法が従来手法より強い振動刺激の提示が可能であり, 低周波になるにつれその性能差が顕著になる可能性が示唆された. しかし前報の実験では被験者数の少なさから統計検定は行われず, また電圧のみを測定の対象としており, 消費電力の観点からも効率的かを検証する必要があった.

本稿では多人数での実験を行うとともに, 消費電力の観点から効率を議論した.

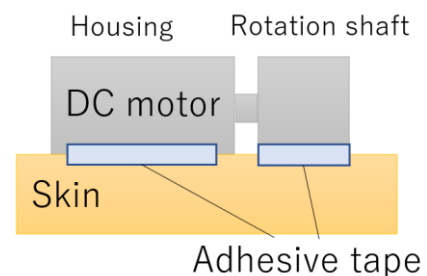


Fig. 1 Overview of the device

2. 実験

本実験の目的は、提案手法が従来手法である錘の往復回転による振動提示[4]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、7種類の周波数における3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。

2.1 実験セットアップ

実験では、まずソフトウェア (Processing) により各周波数の正弦波を生成し、アンプを通し DC モータを駆動した。使用したアンプはステレオパワーアンプ (FX-AU DIO- FX202A/ FX-36A PRO)であり、基準刺激用と調整対象用で2つ用意した。使用した DC モータは、Maxon Motor 144457 (DC motor RE10 EB 1.5W SL 1WE, gear GP10K 0.015Nm 2ST GL) であった。フレームは Fig. 2 に示す寸法で 3D プリンタにより制作した。重量は筐体側 (モータ込み) で 23g, 回転軸側で 6g であった。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。

計測部ではオシロスコープのプローブを、DC モータの端子につなぐことで電圧値を、DC モータと直列につないだ抵抗 (メタルクラッド抵抗 25W 0.1Ω) の両端につなぐことで、電流に比例した電圧を観測して電流に換算する方法で電流値を測定した。オシロスコープの表示で、電圧×電流の電力波形を表示した。

2.2 実験条件

本実験は、6名 (22~26 歳, 右利き, 男性) を対象に実験を行った。本実験ではボリューム付きアンプを介し正弦波の交流電圧を DC モータに印加するが、その供給電力を調整の対象とした。手法の条件は Fig. 3 に

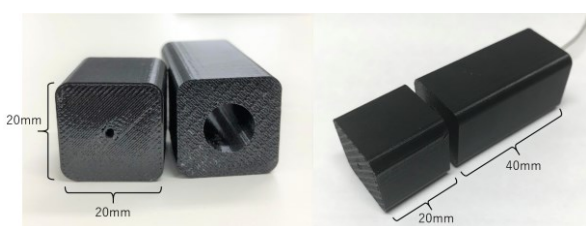


Fig. 2 Size of the device

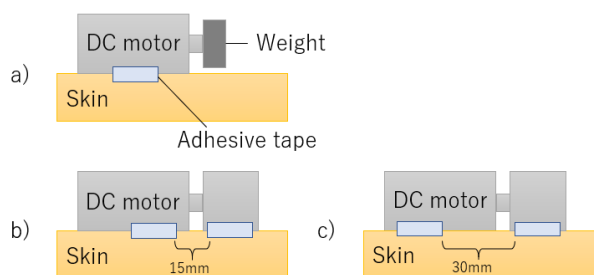


Fig. 3 Experimental methods

示す (a), (b), (c) の 3 種類とした。1 つの粘着テープの面積は 13×15mm とした。手法 (a) を基準刺激とし、アンプのボリュームは常に一定になるよう固定した。また、回転軸に提案手法の回転軸側フレームと同等の重さの錘を装着した。振動子の装着位置は前腕部中央とし、回転軸側が肘側に向くようにした。測定の組み合わせは Table 1 のように 5 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, 128Hz の 7 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。

Table 1 Combination of method attach to the left and right arm.

(Left arm(reference), Right arm)	(a, a)	(a, b)	(a, c)
(Left arm, Right arm(reference))		(b, a)	(c, a)

2.3 実験手順

DC モータを左右の腕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アンプのボリュームを調整させ、一致した際の調整対象の方のオシロスコープの電圧振幅及び平均電力の計測結果を記録した。手法 5 種類の組み合わせごとに 7 種類の周波数を 1 回ずつ、計 35 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 Fig. 4 に示す。被験者は実験中、ヘッドホンでピンクノイズを聞いていた。振動は 1 秒提示 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指示した。振動が停止している間に

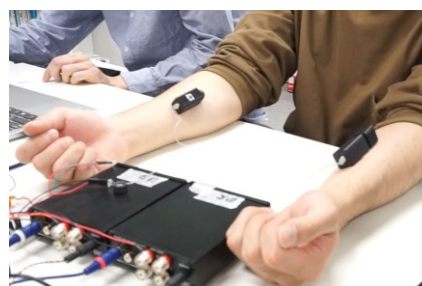


Fig. 4 Condition of the experiment

被験者には目を開き振幅の調整を行うよう指示した。1回の測定の調整の回数に制限は設けなかった。

(a, a) に関しては1回分で、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2回分で平均をとり、例えば、(a, b) と (b, a) の平均を手法 (b) の結果として記録した。

3. 結果

各周波数における手法 (a), (b), (c) と基準刺激の電圧振幅及び平均電力の平均と標準偏差は Fig. 5 のようになる。どの周波数においても提案手法 (b), (c) の電圧振幅及び平均電力は基準より低かった。また、各手法の電圧振幅及び平均電力の基準刺激に対する比率を Fig. 6 に示す。手法 (a) の条件において、ほぼ1に近い値となっているため左右の腕で強度の知覚に大きなずれのある被験者はいなかった。Fig. 6 において、周波数ごとの各手法のグラフをみると、提案手法は 8~64Hz において低周波になるほど平均電力及び電圧振幅ともに低くなるとわかった。しかし 64Hz と 128Hz では電圧振幅及び平均電力の比率において差はなく、また 2~8Hz において平均電力の比率は低周波になるほど大きくなり、また電圧振幅の比率は横並びになった。

次に周波数及び手法の違いによって、平均電力及び電圧振幅の基準に対する比率に差が見られるかどうか

を検証するために、独立変数を周波数と手法、従属変数を平均電力、または電圧振幅の基準に対する比率とする、対応のある2要因の分散分析を行った。

まず従属変数を平均電力の基準に対する比率として分析を行った。その結果、周波数の主効果は1%水準で有意であるとは言えなかったが ($F(1.665, 8.326)=5.98$, n.s.), 手法の主効果は有意であった ($F(2, 10)=257$, $p<.01$)。また有意な交互作用は認められなかった ($F(2.220, 11.100)=3.056$, n.s.)。ボンフェローニの方法による多重比較の結果、すべての周波数において手法 (b), (c) は手法 (a) より有意に低く(いずれも $p=.000$)、手法 (b), (c) 間では有意な差は認められなかった。また各手法における周波数間の有意差を Fig. 6 に示す。

次に従属変数を電圧振幅の基準に対する比率として分析を行った。その結果、周波数及び手法の主効果と交互作用は 0.1%水準で有意であった (順に $F(2.444, 12.220)=20.924$, $p<.001$; $F(2, 10)=559.657$, $p<.001$; $F(2.535, 12.675)=14.536$, $p<.001$)。ボンフェローニの方法による多重比較の結果、すべての周波数において手法 (b), (c) は手法 (a) より有意に低く(いずれも $p=.000$)、手法 (b), (c) 間では有意な差は認められなかった。また各手法における周波数間の有意差を Fig. 6 に示す(有意水準5%に関しては、数が多いため割愛した)。

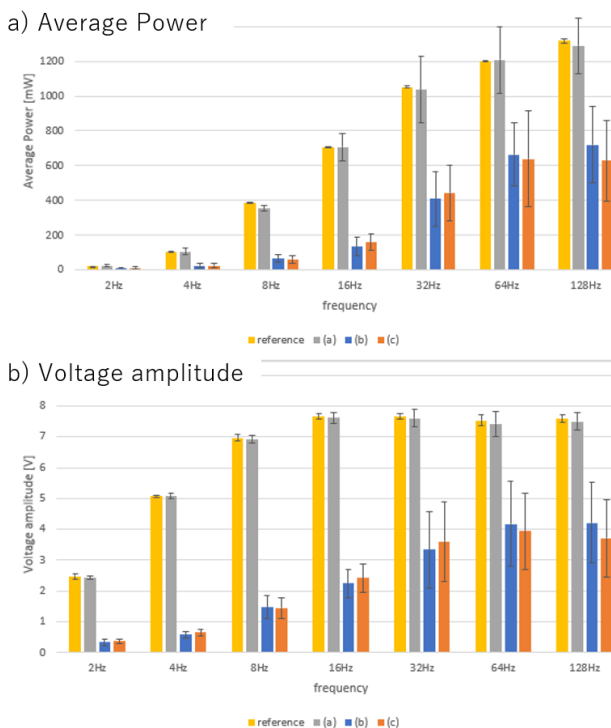


Fig. 5 Mean and standard deviation of (a) the average power and the (b) voltage amplitude (b) for each method

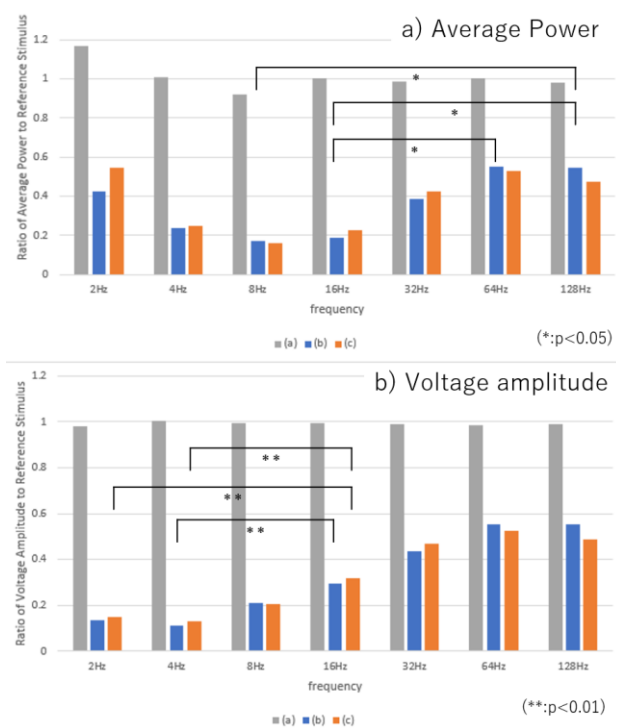


Fig. 6 Percentage of (a) the average power and (b) voltage amplitude to the reference for each method

4. 考察

今回の実験で、どの周波数においても提案手法の電圧振幅及び平均電力は基準より低く、提案手法が従来手法より少ない電力で同等の刺激を提示できることが示された。

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が予想されたが、実験の結果消費電力の観点から見ても本提案は従来手法より効率よく強い刺激を提示可能であることが検証できた。

今回の実験では PC の正弦波の出力、アンプのボリュームなどを一定にしたが、基準刺激のモータに供給される平均電力及び電圧振幅を計測すると周波数によって違いが出てしまった。絶対的な消費電力について議論するためには、DC モータのトルクを統制し実験を行う必要があると考えられた。

8~64Hz の領域で低周波になるにつれて提案手法がより高い性能を発揮できた理由としては、同じ角速度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強い刺激を提示できることが原因と考えた。2~8Hz の周波数領域で低周波になっても性能が向上しない理由としては、回転軸の回転量及び回転時間がある程度より長くなると皮膚に回転運動が妨げられ動かなくなり、変化のない皮膚牽引が振動刺激として知覚されないこと、あるいは低周波領域で PC の正弦波の出力が落ちたことで刺激が弱まり、満足に調整ができなかったことが原因と考えた。64Hz と 128Hz で基準刺激に対する平均電力及び電圧振幅の比率が変化しなかった理由としては、この付近の周波数から回転量が十分小さくなり周波数の違いによって皮膚牽引のストロークの差がなくなったためと考えた。

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、強い振動と直流成分を皮膚に提示可能な手法について知覚実験を行い、手法の有効性を検証した。新たに統計検定を行った。その結果、一部周波数により振動提示の性能に差があることがわかった。今後の展望としては、実験条件の統制について改善し、また被験者を増やすことで十分なデータを得ていく。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] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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.