

# 低周波振動触覚のための DC モータを用いたアクチュエータの設計

## Design of an Actuator using DC motor for Vibrotactile Presentation in Low Frequency

○ヤヰム ヴィボル (電通大) 岡崎 龍太 (電通大, 日本学術振興会) 梶本 裕之 (電通大)

Vibol YEM, The University of Electro-Communications, yem@kaji-lab.jp

Ryuta OKAZAKI, The University of Electro-Communications, JSPS Research Fellow, okazaki@kaji-lab.jp

Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications, kajimoto@kaji-lab.jp

Similar to Haptuator from Tactile Labs Inc. and Force Reactor from Alps Electric Co., DC motor can produce high fidelity vibration when it is driven by alternative current such as audio input signal. In our study, we developed a new vibration actuator using a DC motor that can generate much stronger vibrations than a normal DC motor and produce very low frequency of vibrations. We proposed that the stator of the motor could be used as the vibration mass by fixing the rotor of the actuator. To evaluate this design concept, we developed a prototype actuator that can be driven in two modes: stator mode (i.e., the new design concept) and normal mode. The experiment results revealed that stronger vibrations can be obtained on a fingertip in stator mode because the fixed part that comprises the rotor was lighter and the vibration mass using the stator was heavier. We also confirmed that the actuator can be driven at very low frequency (1 Hz) in stator mode.

**Key Words:** Vibration actuator, DC motor, Low frequency

### 1. はじめに

触覚フィードバックや触覚体験のために様々な振動子が開発されている。偏心モータやLRA (Linear Resonant Actuator) は、小型、軽量で振動を提示できる利点から、携帯電話、ゲームコントローラ、視覚障害者案内装置などにおける振動提示に広く使われている [1][2][3]。しかし、これらの振動子は特性上、振幅と周波数を独立に制御出来ないか、ある単一周波数の振動しか提示できず、その用途は警報などの情報提示に限られている。これに対して、Voice Coil を用いた振動子 [4]、Tactile Labs 社の Haptuator [5] や Alps 電気社の Force Reactor [6] の振動子は、応答性がより良く、ボタンのクリックやテクスチャーなどの感覚のような、より高品位な触覚の提示に使われている。しかし、これらの振動子は、振動の錘が直線上に往復運動をするという構造上、特に低周波領域において大きな振動振幅を提示すると、錘が筐体と衝突してしまう。このため特に低周波領域での振幅を高くすることが難しいという課題がある。

この問題に対して我々は前回の報告において、通常の DC モータを Voice Coil と同様に高品位な触覚提示に利用することを提案し、その性能を確認した [7]。モータのロータ (モータの回転軸) を振動の錘とすることにより、筐体 (モータのステータ) との衝突が原理的に生じない。すなわち、DC モータを利用することで、低周波で大きな振幅の振動を提示可能である。

本研究では、さらに通常の DC モータよりも強くかつ低周波での振動を提示可能とするために、モータのステータを振動の錘とする方法を提案する。本稿は提案振動子の設計・プロタイプを紹介し、その振動提示の効果検証の結果を報告する。

## 2. DC モータを用いた振動アクチュエータ

### 2.1 DC モータの反力

DC モータに電流を印加すると、ロータにトルク  $T_r$ 、モータ

外壁と皮膚との間に  $T_r$  と比例する反力  $F_s$  が発生する (図 1 (左))。トルクは電流に対して比例であり、大きな力が必要な時は電流を多く流せば良い。しかし一方で、電圧入力に対してはロータの回転数に比例した逆起電力が生じるために、回転速度が大きくなるほどトルクが下がるという現象が発生する (同じ電流を流そうとするとさらに大きな電圧が必要となる)。本研究では、これらの 2 つの特性に基づいて DC モータを振動子として利用する方法を検討する。

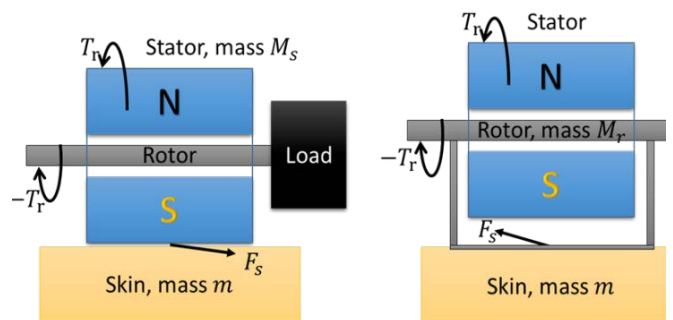


Fig. 1 The stator is fixed and load is added to rotor to obtain high counterforce and smooth movement (left). Instead of using load, the rotor is fixed and stator is free (right).

DC モータを振動子として使用する場合、DC モータに交流電圧を印加すると、ロータに往復の回転運動が生じ、反力の方向変化により振動が生じる。高周波振動を対象とした場合にはロータの回転方向が高速に切り替わるため速度自体は上がらず、前述のようにトルクの低下が生じないために軽量のロータでも大きなトルクを出すことが出来る (強い振動を得られる)。しかし低周波振動の場合は周期が長くなることで、ロータの回転が最大速度になり、トルクが減少する。大きなトルクを得るためには、ロータの質量を増大させて慣性モーメントを大きくすることで、回転速度を落とす方法が考えられる。これは、フライホイールによって慣性モーメントを大きくする

方法と同様に、モータ回転がスムーズな動きとなる利点もある[8][9]。しかし、モータの質量の増大は、振動子全体の重量の増大につながり、ウェアラブルな触覚提示装置の構成要素としては好ましくない。

## 2.2 指先における振動の加速度

以上の問題を解決するため、本研究では図1(右)のようにモータの回転軸(ロータ)を固定してフライホイールの代わりにDCモータのステータを利用する方法を提案した。

指先に反力 $F_s$ をかけると、指先の皮膚の加速度が以下の方式で表現される。

$$a = \frac{F_s - c \times v - k_r \times x}{(m + M_r)} \quad (1)$$

ここで、 $a$ 、 $v$ 、および  $x$  はそれぞれ皮膚の加速度、速度及び変位である。また、 $m$  および  $M_r$  は皮膚およびモータのロータ(皮膚と固定部)の重さ、 $c$  と  $k_r$  は皮膚の剛性による係数である。

式(1)より、提案機構は、ロータを利用した固定部がモータステータよりも軽量のため、通常のDCモータよりも強い加速度を皮膚に与える事ができる。すなわち、指先により強い振動を得られると期待できる。

## 2.3 振動子の設計

提案した手法に基づいた振動子機構の設計とプロトタイプを図2に示す。回転軸を固定しやすくするためにチタン製のカバーを取りつけた。また、ケーブル自体が筐体とともに回転してしまう問題を解決するため、第二次のブラシを作成した(第一次はモータ内部の本来のブラシである)。このような機構とすることで、振動子は2つのモードで駆動することができる。モータのステータを固定してカバーを回転する通常モード(ケーブルを第一次ブラシと接続)および、カバーを固定してモータステータを回転するステータモードである(ケーブルを第二次ブラシと接続)。

プロトタイプで利用したDCモータは、Maxon RE 1.5 W (118396)であった。このモータのロータは、鉄心がなくコイルと軸のみ構成されたため、軽量である。チタン製のカバーと合わせて2gであり、ステータの重量(9g)と比較して有意な差がある。振動子は、サイズが12 mm × 31 mm、重量が11gである。

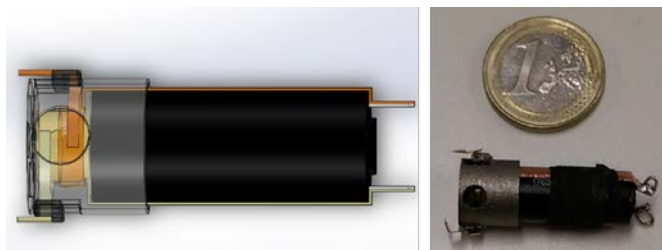


Fig. 2 The stator is fixed and load is added to rotor to obtain high counterforce and smooth movement (left). Instead of using load, the rotor is fixed and stator is free (right).

## 3. 実験

本実験では、提案手法の効果を確認するために、ステータモードと通常モードによる振動振幅を測定した。本研究の仮説は、ステータモードはより強い振動を提示できるのであった。今回の評価は「指先への振動提示」という状況に限定して行った。

### 3.1 装置

振動子を指先に固定するため、チタン製の指先型グローブを作成した(図3)。重量は5gである。グローブは、通常モードの場合、DCモータのステータ(図3(左))、ステータモードの場合、カバーを固定する(図3(右))。

振動の測定には加速度センサ(MPU9250、InvenSense; 200-Hz ローパスフィルタ、1-kHz サンプリングレート)を用い、マイコン(mbed NXP LPC1768)を介してPCにてデータ収集を行った。入力信号は、PC上で音声信号処理ソフトPureDataにより生成し、オーディオアンプ(M50、MUSE Audio Technology)で増幅された。

通常こうした周波数特性の計測を行う場合、電圧一定の入力信号を用いることが多い。しかしここでは入力エネルギーに対する振動の効率を測定した。与えられた電力(電流×電圧)を観察するため、振動子と並列に接続した1Ω抵抗とオシロスコープ(TDS 1002C-EDU、Tektronix)を使用した(図4)。振動子に印加される電流は、1Ω抵抗の間の電圧によって計測できる。

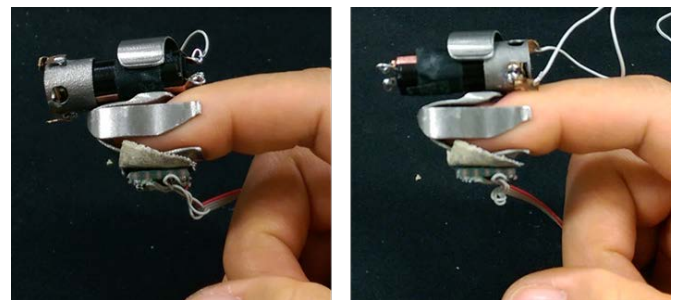


Fig. 3 Vibration actuator operating in normal mode (left) and stator mode (right).

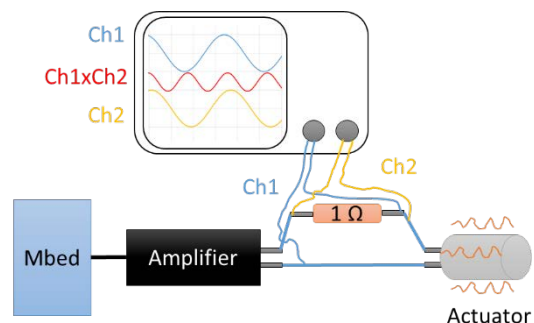


Fig. 4 Diagram of measurement system.

### 3.2 被験者と手順

今回の被験者は著者1名であった。著者は椅子に座り、振動子と加速度センサを取りつけた指先型グローブを右手の人差

し指に装着した。安定のため、手を机の上に置き力を抜いた。入力信号は 10 Hz から 200 Hz までのサイン波形であった。著者は、各モードと各周波数において、電力が 0.3 W となるようにオーディオアンプのボリュームを調整した。各条件において、5 回の測定を行い、5 回の振動振幅の平均値を取得した。加速度センサによる測定は 3 秒間かけて行い、各軸の振幅の平均値の自乗根を求めた。

### 3.3 実験結果と考察

0.3W の電力入力に対する周波数特性の比較グラフを図 3 に示す。横軸と縦軸はそれぞれ、入力信号の周波数と加速度の振動振幅である。各モードによる振動振幅のピークは、周波数が 50 Hz のときであった。すべての周波数において、ステータモードによる振動振幅は、通常モードよりも大きかった。

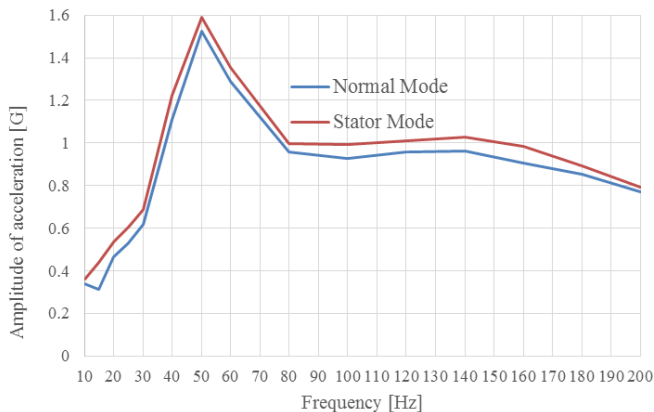


Fig. 5 Frequency response for each mode.

以上の結果によって、提案手法は効果があることが分かった。式 (1) に示したように、振動の強度は、振動させる対象物の重量と反比例の関係にある。ステータモードでは、比較的軽いロータを固定部とし、対象物の合計重量が軽くなるため、振動振幅が大きくなった。ただし振動の強度は皮膚の重量や剛性にも依存するため、振動子の固定部より十分に重く、または剛性の係数が大きい皮膚においては、効果が出ないこともあると考えられる。

図 6 に示した実験とは別に、最も低い周波数として 1Hz の入力において開発した振動子の駆動を試した。通常モードの場合、入力電圧を 9 V の最大電圧 (モータの公称電圧が 6 V) まで上げて電力が 1 W まで上がらなかったことを観察した。これは、カバーとロータの合計の重量が軽く、小さな電流でもロータが最大速度に達したことを意味する。すなわち、回転速度の上昇に伴って生じた逆起電力によりトルク (または電流) を上げることができなかった。これに対して、ステータモードの場合は、1 W まで上げることができた。

低い周波数の 1Hz において人が振動を感じるか、確認するために 5 人の被験者に体験させた。振動子が指先と垂直となるように装着した (図 6)。電力を 1 W として体験させたところ、振動よりも、指先が前後に繰り返して押されているように感じ、掌から押された力の方がより強かったとコメントが得られた。

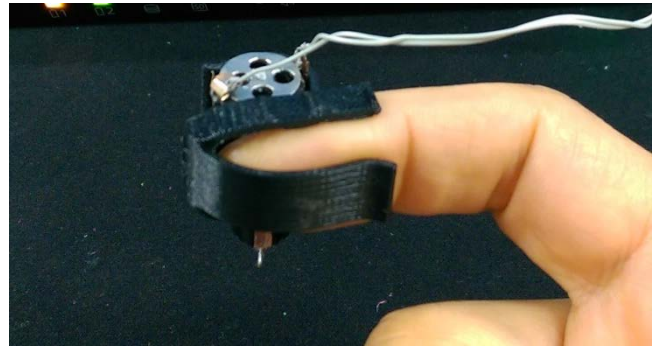


Fig. 6 The prototype was vertically attached to an index finger for providing pushed force sensation by presenting the low frequency of vibration.

## 4. おわりに

本稿では、通常の DC モータよりも低周波数における振動提示をより強く行うことができるステータモードを提案した。このモードでは、モータのロータを固定し、筐体 (ステータ) を錘として回転するようとした。ステータモードは 2 つの利点が存在する。錘による新たな質量の増加が無いため振動子を軽量化でき、また固定部としたロータがステータよりも軽い場合、強い振動を得られる。評価実験の結果、ステータモードによる振動の方が、通常モードより振幅が大きくなることを確認した。

今後は、今回の発見を元に、指先に低周波の振動を与えることで圧覚を提示するアルゴリズムを開発する。

## 謝辞

本研究は JST-ACCEL「身体性メディア」プロジェクトの一環として行われた。

## 文献

- [1] S. Pabon, E. Sotgiu, R. Leonardi et al., "A Data-Glove with Vibrotactile Stimulators for Virtual Social Interaction and Rehabilitation." Workshop on Presence, pp. 345-388 (2007)
- [2] Y., Wang, K.J., Kuchenbecker, "HALO: Haptic Alerts for Low-Hanging Obstacles in white cane navigation." Proc. of IEEE Haptics Symposium, pp. 527-532 (2012)
- [3] D., Pyo, T.H., Yang, S., Ryu and D.S., Kwon, "Novel linear impact-resonant actuator for mobile applications." Sensors and Actuators A: Physical, vol. 233, pp. 460-471 (2015)
- [4] 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)
- [5] Tactile Labs Inc.: <http://tactilelabs.com/>
- [6] Alps Electric Co. : <http://www.alps.com/e/>
- [7] V., Yem, R., Okazaki and H., Kajimoto, "Vibrotactile and Pseudo Force Presentation using Motor Rotational Acceleration." Proc of HapticsSymposium (2016) (accepted)
- [8] K.C., Agrawal, "Industrial Power Engineering and Applications Handbook." Newnes Press (2001)
- [9] D.G., Dorrell and M., Popescu, "Drive Motor Designs for Electric Motorcycles." Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 4354-4351 (2012)