

# モバイルデバイスのためのベルト巻取り機構を用いた 省エネルギーでの振動提示

## Efficient vibration presentation using belt winding mechanism for mobile device

○中村 拓人（電通大，日本学術振興会特別研究員） Vibol Yem（電通大） 梶本 裕之（電通大）

Takuto NAKAMURA, The University of Electro-Communications, JSPS, n.takuto@kaji-lab.jp

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

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

For operation and experience in mobile devices, vibration feedback is used in addition to audio-visual feedback. In general, however, the vibrators need to drive the entire body of the device which is larger than the actuators, and it is difficult to present a strong vibration stimulus in a mobile environment requiring small size and low energy actuators. Therefore, we propose a device that drives by winding a thin belt with DC motors, and presents vibration by touching the belt with a fingertip. This method makes it possible to present vibration with low energy by vibrating a lightweight belt instead of the entire device body. In this paper, we measured the frequency characteristics of the proposed device and compared the power required for the vibration presentation with the conventional vibrators. As results of experiments, it was confirmed that the proposed device can present vibration with less energy than conventional devices.

**Key Words:** Pseudo-Haptic, Perceptual force, Haptic Display

### 1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末などのモバイルデバイスの操作には視聴覚に加えて振動などの触覚によるフィードバックが用いられる[1][2]。一般的に振動子はデバイス内に組み込まれているために、ユーザへの振動提示には振動子がデバイス筐体全体を振動させる必要がある。このため、強い振動を提示するには、筐体全体を大きく振動させる大エネルギー又は大型アクチュエータが必要となり、モバイル環境での実現の障害となっていた。

そこで我々はベルト巻取り機構を用いたモバイルデバイスでの省エネルギーでの振動提示手法を提案する。本手法ではPETフィルム製のベルトをDCモータによって巻き取ることでベルトを振動させ、振動しているベルトを触ることで指へ振動提示を行う。本手法ではアクチュエータであるDCモータはベルトと皮膚のみを駆動させるため、設置するデバイスの大きさや重さに関係なく振動提示が可能となる。

本論文では提案するベルト巻取り機構を用いた振動提示の詳細について報告する。本手法の検証のためDCモータマウント付きのスマートフォンケースを設計しプロトタイプを作成し(図1)、出力加速度の周波数特性の計測及び従来手法である振動子との振動提示に必要な電力の比較を行う。

### 2. 関連研究

モバイル環境での振動刺激の提示には、多くの場合デバイスに搭載されている振動子によって行われる。振動子を駆動させデバイス筐体全体を振動させることで把持している指や掌へ振動提示を行っている。搭載される振動子には偏心モータ、ボイスコイル、圧電アクチュエータなどがあるが、コンシューマデバイスには主にエネルギー効率の良い偏心モータ型や広い帯域の周波数の振動出力が可能なボイスコイル型[8][9]が用いられている。しかし、これらの振動子はモバイルデバイスに搭載させるために小型であることと、アクチュ

エータ本体より大きなデバイス全体を振動させることを同時に求められる。よって、振動子がユーザに伝えられる振動の強さには限界がある。



Fig. 1 Prototype of the proposed device: this device presents vibration using belt-winding mechanism

触覚研究分野ではデバイス本体を振動させる以外の手法によっても振動提示が行われている。指先へ直接機械刺激を提示するピンアレイを用いた手法では、高密度にピンを垂直方向[10]又は水平方向[11]へ駆動し、指先へ振動や材質感を提示している。これらの手法は高密度に機械刺激を提示可能であるが、振動の振幅を増加させるにはピンの長さを伸ばす必要があり小型で強い振動を提示することは難しい。指への機械刺激ではなく、電気刺激によって直接神経を活動させる手法も提案されている[12][13][14]。電気刺激で用いる電極は透明・薄型で設計可能[12]でモバイル環境への応用も行われているが、感覚増加のために電流量を増加させれば感覚の増加に伴い痛みも増加してしまうという課題がある。

また、モバイルデバイス本体上ではなく提示部位に振動提示デバイスを装着し、皮膚を直接刺激する手法も提案されている。稲葉と藤田[3]は指先に装着した DC モータによってベルトを巻き取ることで指先を変形させ触覚提示を行うデバイスを提案している。また、GravityGrabber[4][5]では同様に2つのDCモータを用いてベルト巻取りを行いテクスチャ感や重さ提示を実現している。Yemら[6]はDCモータを指先を覆うデバイスを装着し、偏加速度振動を印加することで擬似力覚を提示している。これらの手法ではアクチュエータが提示部位のみを刺激しているために、デバイス筐体全体を駆動させる手法と比較して小規模で振動提示が可能である。しかし、デバイスを指先に装着する必要があるため、指先を用いて操作行うモバイル環境での使用は困難であるという課題があった。

そこで本研究は装着型デバイスで用いられてきたDCモータによるベルト巻取り機構をモバイルデバイスに搭載し振動提示を行う。ユーザは振動している PET フィルム製ベルトに触れることで振動を知覚する。本手法では振動子はベルト及び触れている皮膚のみを駆動するため省エネルギーで振動提示が可能である。また、今回用いたフィルムは薄く軽量なため、フィルムの面積増加の影響も少ない。このように本手法は振動させたベルトを介して振動提示を行うことで、モバイル環境において省エネルギーでの振動提示を実現する。

### 3. ハードウェア

図2-図4に作成したプロトタイプの詳細を示す。デバイスは3DプリントされたABS樹脂製のスマートフォンケース、グリッピング(Banker Ring 3, i&PLUS, Japan)、2つのDCモータ(HS-V1S, S.T.L. JAPAN Inc., Japan)、ベルト巻取りシャフト、PETフィルム製ベルトによって構成される(図3)。またベルトの水平方向移動を促すため、ガイドパーツを用いた。本デバイスではDCモータへオーディオ信号をオーディオアンプ経由で印加しベルトを振動させる(図4)。振動提示はユーザが振動しているベルトに触れることで行われる。

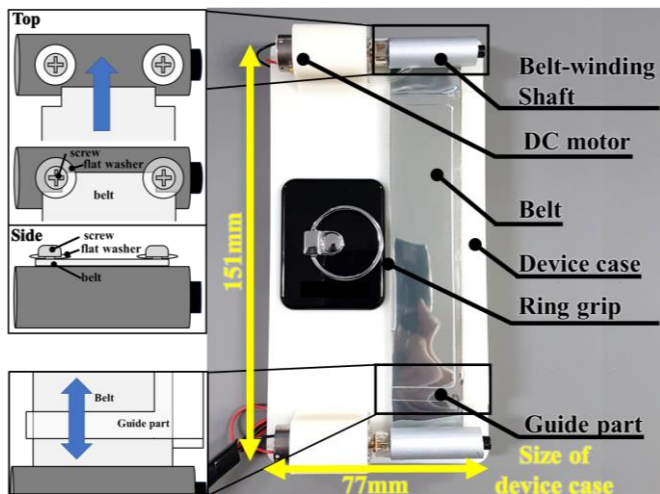


Fig. 2 Configuration of the device (Top view)

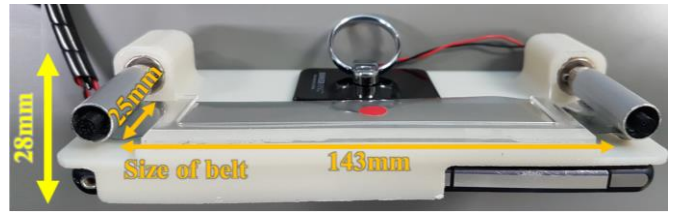


Fig. 3 Configuration of the device (side view)

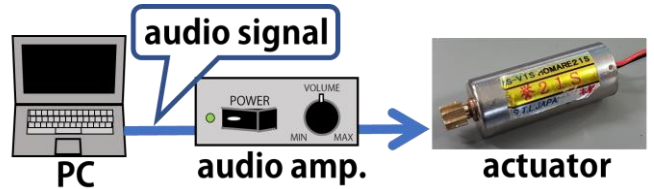


Fig. 4 Configuration of the whole system

本デバイスでは振動させたベルトへの指接触方法によって指腹及び末節へ振動提示を行う。まずベルトの上に指腹を載せることで皮膚のせん断変形方向に振動提示を行う(図5上)。本デバイスはベルト全体が振動しているため複数へ指腹振動提示が可能である。次に振動しているベルトとスマートフォンケースの間に指を入れることで、末節皮膚へせん断方向の振動提示を行う(図5下)。

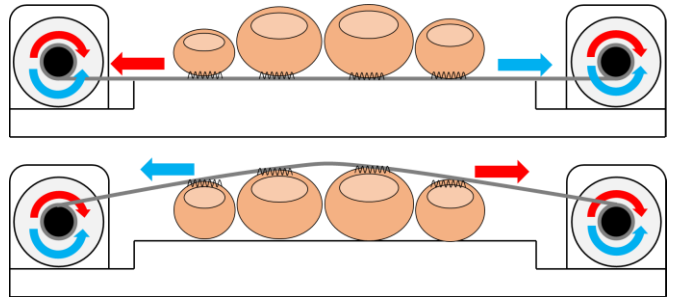


Fig. 5 Methods of presenting vibration

### 4. 実験

#### 4.1 周波数特性計測

本デバイスの出力の周波数特性を調査するため、複数周波数の正弦波を出力した際のベルトの振動角度の振幅を計測した。

本計測は以下の環境で行った。加速度計測は3軸加速度センサ(BMA180, Bosch)をベルト中央に貼り付けを行った。加速度センサは各軸の計測幅を $\pm 4G$ で設定し、センサ値はマイコン(mbed LPC1786, NXP Inc.)によってサンプリングレート1kHzで取得し記録した。加速度計測は3秒間行い各軸で1周期毎に正負の最大振幅の差を記録し、計測後に平均を算出し各周波数での計測結果とした。

また、本計測では2つのDCモータに印加する電力は合計1Wになるよう調整した。印加電力の計測手法はYemら[6]が用いた $1\Omega$ 抵抗とオシロスコープを用いる手法を採用した。Fig. 6のように $1\Omega$ 抵抗を組み込み、オシロスコープで各部位を計測することで、オームの法則よりDCモータに印加される電圧

と電流を計測した。計測された電圧及び電流波形をオシロスコープ内で乗算を行うことで電力波形を生成し、振幅が1Wになるよう出力を調整した。

計測条件は2つの指接触方法及び20個の出力周波数を用意した。ベルトへの指の接触方法はベルト上に指を載せる方法とベルト下に指を入れる方法の2つの条件を用意した。出力周波数は20Hz-400Hzの正弦波を20Hzきざみで合計20周波数用意した。計測は筆者がデバイスを右手で把持し、右手中指を用いて各接触条件を行った。指を載せる条件ではベルト中央に中指を置くよう努めた。

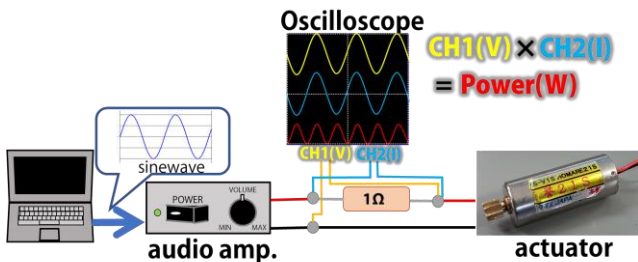


Fig. 6 Setup for measurement of the power

計測結果を図7に示す。グラフの縦軸は計測加速度、横軸は出力周波数を表している。両方の指接触条件において60Hz-100Hzの低周波で高い値を示し、250Hz以降では低い値となっている。本デバイスでは先行研究[6][7]で指に装着する形で使用されていたものと同じDCモータを用いたが、先行研究で得られている周波数特性計測と今回の結果は50Hz程度でピークを迎える点が類似しており、ベルトを介しても低周波を強く提示できていることがわかる。

指接触条件間の結果に着目すると、高周波においてベルト下条件が高い値を示している。これはベルト上条件ではベルトを指が抑えているために振動が減衰するのに対し、ベルト下条件ではベルトを抑えられなかったために、指の重さによる負荷が少なかったことが影響していると考えられる。

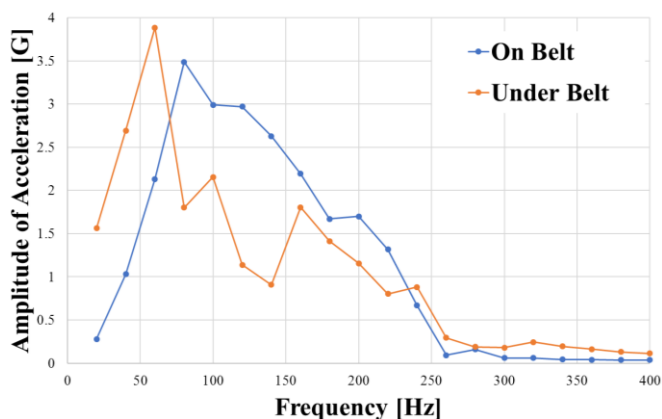


Fig. 7 Acceleration on the belt on each frequency

#### 4.2 既存振動子とのエネルギー比較

本デバイスが従来の振動提示手法と比較し省エネルギーで振動提示が可能かを検証した。既存振動子を定電力で駆動させた比較用デバイスを用意し、被験者に提案デバイスからの

感覚の強さが比較用デバイスと同じになるよう提案デバイスの出力を調整させ、振動提示に必要な電力を比較した。

本実験では提案デバイスに加えて比較用デバイスを用意した。比較用デバイスは提案デバイスで用いたスマートフォン及びケースに研究用途で広く使用されている振動子(Haptuator Mark II, Tactile Labs)を2つ搭載したものである(図8左)。両デバイスにはオーディオアンプ(RSDA202, RASTEME SYSTEMS Inc.)で増幅されたオーディオ信号が印加される。また両デバイスに印加される電力は周波数特性計測で用いた手法で計測し、比較用デバイスは常に1Wで駆動するよう調整した。

被験者は9名(21-33歳、男性8名、女性1名)の研究室メンバーを採用した。まず被験者は1Wで駆動している比較用デバイスを把持し、次に提案デバイスから得られる感覚の強さが同じになるようオーディオアンプのボリュームを0の状態から調整させた(図8右)。被験者は感覚調整のためのデバイス把持は何回でも行ってよいこととした。

本実験は以下の条件で行った。提案デバイスの把持は周波数特性計測で用いたベルト上に指を載せる条件を採用した。また提示する振動は25Hz, 50Hz, 100Hz, 200Hz, 400Hzの正弦波5種類を用意し、各周波数ランダムに5回提示した。



Fig. 8 (Left) Devices used in the experiment, (Right) Overview of the experiment

実験結果を図9に示す。グラフの縦軸は被験者が調整した提案デバイスへの印加電力、横軸は提示周波数、エラーバーは標準偏差を示している。

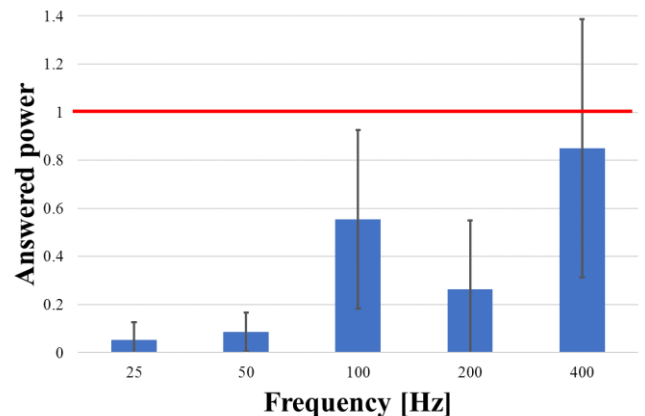


Fig. 9 Answered power compared with the vibrator driven in 1W

全周波数において提案デバイスは既存振動を用いた比較用



デバイスと比較して振動提示に必要な電力の平均値が少ないことがわかる。特に低周波(25Hz, 50Hz)での条件では平均で20%以下の電力で振動提示を実現された。また100Hzにおいて必要な電力は一旦増加し、200Hzで再度減少した。Yemら[6]はDCモータを振動子に転用する際に複数のアクチュエータにおいて周波数特性の調査を行っている。先行研究によると提案デバイスで採用したDCモータの共振周波数は50Hz周辺、比較用デバイスに採用した振動子の共振周波数は100Hz周辺であった。よってDCモータの共振周波数付近ではDCモータが強く振動されたために必要な電力が比較的少なく、振動子の共振周波数付近では振動子が強く振動したために必要な印加電力が増加したことが考えられる。

本手法が既存振動子よりも省エネルギーで振動提示可能な理由を考えてみると、水平方向の皮膚変形によって振動を伝搬させたことも要因の一つと考えられる。本デバイスではベルト巻取り機構によってDCモータの回転方向の振動を水平方向の振動に変換し、ベルトに触れることで振動を提示する。指先では垂直方向の皮膚変形よりもせん断方向の刺激をより敏感に知覚することが報告されている[15]ことから、本デバイスの回転方向から水平方向への振動の変換が振動知覚をより敏感にさせ振動提示に必要なエネルギーが減少したと考えられる。

## 5. おわりに

本論文ではモバイル環境において省エネルギーでの振動提示手法の実現を目指し、ベルト巻取り機構を用いた振動提示デバイスの提案を行った。DCモータによってフィルム製ベルトを巻取り・振動させ、指先を触れさせることで振動提示を行った。本デバイスでのベルト振動の周波数特性を計測し駆動に用いたDCモータと同じ50Hz付近が共振周波数であることを確認した。また振動提示に必要な電力を従来手法と比較したところ、従来手法よりも少ない電力で振動提示が可能であることが示唆された。

今後は刺激を指の甲に与えた際の消費電力の比較を再度行うことで、最適な振動提示手法の調査を行う。また、本デバイスを用いたアプリケーション開発を行う。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費16J09326の助成による。

## 文献

- [1] M. Fukumoto, T. Sugimura. "Active click: tactile feedback for touch panels." In Proc. of CHI'01 Extended Abstracts, 2001, pp.121-122.
- [2] P. Ivan, S. Maruyama, J. Rekimoto. "Ambient touch: designing tactile interfaces for handheld devices." Proc. of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology, 2002, pp.51-60.
- [3] 稲葉, 藤田, "指先圧迫による擬似反力提示装置の提案と試作.", VR学会論文誌, 2007, Vol.12(1), pp.95-102.
- [4] K. Minamizawa, D. Prattichizzo, S. Tachi, "Simplified design of haptic display by extending one-point kinesthetic feedback to multipoint tactile feedback", In Proc. of IEEE Haptics Symposium 2010, Walton, 2010, pp.257-260.
- [5] K. Minamizawa, S. Fukamachi, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi. "Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation.", In Proc. of ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies, 2007, p.8.
- [6] V. Yem, R. Okazaki, H. Kajimoto. "Vibrotactile and pseudo force presentation using motor rotational acceleration.", In Proc. of Haptics Symposium (HAPTICS) 2016, 2016, pp. 47-51.
- [7] V. Yem, R. Okazaki, H. Kajimoto. "Low-Frequency Vibration Actuator Using a DC Motor.", In International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, 2016, pp. 317-325.
- [8] Tactile Labs Inc.: <http://tactilelabs.com/>
- [9] Alps Electric Co. : <http://www.alps.com/e/>
- [10] S. Jang, L. H. Kim, K. Tanner, H. Ishii, S. Follmer. "Haptic Edge Display for Mobile Tactile Interaction", In proc. of CHI'16, 2016, pp.3706-3716.
- [11] J. Luk, J. Pasquero, S. Little, K. MacLean, V. Levesque, V. Hayward, "A Role for Haptics in Mobile Interaction: Initial Design Using a Handheld Tactile Display Prototype", In Proc. of CHI'06, 2006, pp.171-180.
- [12] H. Kajimoto. "Skeletouch: transparent electro-tactile display for mobile surfaces." In Proc. of SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies, 2012, p. 21.
- [13] K. A. Kaczmarek, M. E. Tyler, P. Bachy Rita. "Electrotactile haptic display on the fingertips, Preliminary results." In Proc. of 16th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc, 1994, pp. 940-941.
- [14] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda, S. Tachi, "Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation.", In Proc. of 9th International Conference on Artificial Reality and Telexistence(ICAT99), 1999.
- [15] J. Biggs, M. A. Srinivasan, "Tangential versus normal displacements of skin: Relative effectiveness for producing tactile sensations.", In Proc. of 10th Symposium on Haptics, 2002 pp. 121-128.