

ベルト巻取りを用いた広帯域省エネルギー振動提示

中村 拓人^{1,2,a)} ヤエム ヴィボル^{1,3} 梶本 裕之¹

受付日 2017年7月5日, 採録日 2018年2月1日

概要: モバイルデバイスにおける操作や体験では視聴覚によるフィードバックに加えて振動によるフィードバックが用いられている。しかし、一般的に振動提示に用いられている振動子はアクチュエータより大きい筐体全体を駆動する必要がある。小型・省エネルギーが求められるモバイル環境では強い振動刺激を提示することは困難である。そこで我々はフィルム製ベルトを DC モータによって巻き取ることで駆動し、指で触れることで振動提示を行う手法を提案する。本手法はデバイス本体ではなく軽量のフィルム状ベルトを振動させることで省エネルギーでの振動提示が可能となる。本手法はベルトへの指接触方法によって指腹および指の甲へ振動提示を行う。本論文では本手法を用いたプロトタイプを作成し、2つの指接触条件での提案デバイスの周波数特性の計測と、既存の筐体全体を駆動する場合との振動提示に必要な電力の比較を行った。実験の結果本デバイスは両指接触条件において既存振動子より有意に少ないエネルギーで振動提示が可能であることが確認された。

キーワード: ベルト巻取り, モバイルデバイス, 振動覚ディスプレイ

Vibrotactile Presentation with Wide Frequency Range and Low Energy Using Belt Winding

TAKUTO NAKAMURA^{1,2,a)} VIBOL YEM^{1,3} HIROYUKI KAJIMOTO¹

Received: July 5, 2017, Accepted: February 1, 2018

Abstract: To enrich experience or to assist operation in mobile devices, vibration feedback is popularly used. In general, vibration actuator vibrates the whole body of mobile device to transmit vibrotactile sensation. However, it requires high energy to produce strong vibration because the actuator needs to vibrate large mass of the mobile device. In this study, we proposed a method to transmit vibration sensation to a hand with less energy, by vibrating a lightweight belt made of PET film covering the body of the mobile device. We developed a prototype using two DC motors to vibrate the film belt. The prototype can present vibration with two modes; touching on the belt (on belt), and belt covering on the fingers (under belt). We measured electric power required for presenting subjectively the same strength vibration and compared with conventional technique. Result showed that our prototype consumes significantly less energy than the conventional technique, especially for under belt condition.

Keywords: belt-winding, mobile device, vibrotactile display

1. はじめに

昨今触覚研究の分野では、幅広い周波数で駆動できる振動提示デバイスを用いることで、画面上の物体の材質感 [1] などを高品位に提示可能となることが示されている。

こうした振動提示による高品位な触覚表現は、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に適用可能と考えられる。実際、こうしたモバイルデバイスには視

¹ 電気通信大学
The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

² 日本学術振興会特別研究員
JSPS Research Fellow, Chiyoda, Tokyo 102-0083, Japan

³ 日本学術振興会外国人特別研究員
JSPS Postdoctoral Research Fellow, Chiyoda, Tokyo 102-0083, Japan

a) n.takuto@kaji-lab.jp

聴覚に加えて振動フィードバックが用いられている [2], [3]. しかし実際にはこうしたモバイルデバイスに採用されている振動子のほとんどは, 振動振幅と周波数を独立に制御できない偏心モータか, 一定の共振周波数でしか駆動できない直動共振アクチュエータ (LRA: Linear Resonant Actuator) である. これらの振動子は高いエネルギー効率を持つ一方で, 幅広い周波数での表現は不得手である (たとえば LRA は共振周波数から数 Hz 外れるとほぼ振動しない). このため「クリック感」などは提示できていても, 材質感提示などはできていないのが現状である.

では, なぜ幅広い周波数で駆動できる振動提示デバイスがモバイルデバイスで用いられないのであろうか. この問題の 1 つの原因は, モバイルデバイス特有の問題, すなわちエネルギー消費に関する制約の厳しさにあると考えられる. 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, 把持している手への振動提示には振動子が筐体全体を振動させる必要がある. さらに幅広い周波数で駆動できる振動子は共振現象を利用できないためにエネルギー効率が悪い. たとえば典型的な広帯域振動子である Haptuator mk II (Tactiles Labs.) は定格 1.5 W であり, 典型的なスマートフォンの電池容量が約 7 Wh 程度であることを考えると, このエネルギー効率の問題は非常に大きいと考えられる.

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な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, ユーザにベルトを触れさせることで振動提示を行う. 従来手法と異なり, 本手法ではアクチュエータである DC モータはベルトとベルトに触れている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接触している皮膚全体に振動提示が可能となる. なお本提案の本質は振動部分と筐体との分離であるため, たとえばベルトではなく薄い振動板を用いる構成もありうる. しかし現在のところ振動伝搬が可能な板は重くなりがちで, 板自体の振動モードも考慮しなければならない一方で, ベルトの場合にはこうした問題を生じないことから今回はベルトとモータの組合せを採用した.

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で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およ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

これまで手掌部や指先への振動提示を行う取り組みは多くなされてきた. ここでは本研究の関連研究として既存の振動提示手法について述べた後, 特に小型・省エネルギーが求められるモバイル環境へ応用を目的とした手法につい

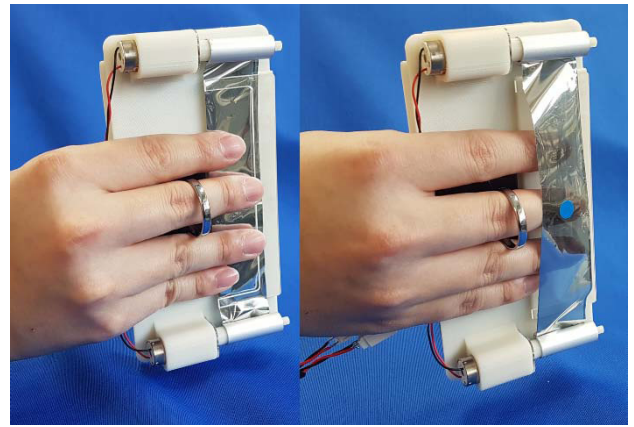


図 1 提案デバイス外観: フィルム製ベルトを DC モータによって駆動し指で触れることで振動を伝搬する

Fig. 1 Overview of the proposed device: The device presents vibration by touching a belt made of PET film vibrated by a DC motor mounted on a mobile device.

て述べる.

手や指への振動提示を行う手法には主に機械刺激によって皮膚を刺激する手法と電気刺激などにより直接神経を活動させる手法がある. 機械刺激を用いた手法には, 皮膚をピンアレイ [4], [5] やベルト [6], [7], [8] によって駆動する手法, 振動子を指 [9] や爪上 [10] に装着する手法など多く提案されている. しかしこれらはモバイルデバイスに向けた手法ではないため, 提示振動の周波数帯域が狭い, 多数のアクチュエータを駆動するため消費電力が大きい, 指を用いた操作を阻害する, 装着が必要であるなど, モバイル環境への応用には課題がある. 神経を直接活動させる手法 [1], [11], [12] では透明・薄型で設計可能なためモバイルデバイスへの応用 [1], [13], [14] もされているが, 感覚増加のために電流量を増加させれば感覚の増加にともない痛みも増加してしまう課題がある. 同様に透明電極を用いる手法として静電気による摩擦制御を用いる物がさかんに研究されている [15], [16]. ただしこの方法は摩擦力の制御を用いているため指を動かして初めて触覚が提示されるものであり, 用途は限られると考えられる.

モバイル環境への応用を目指した機械刺激を用いた振動提示には, 偏心モータや LRA が主に用いられているが, 前述したように高いエネルギー効率を持つ一方で, 振動振幅と周波数を独立して制御できない, または提示振動の周波数帯域が狭いなど高品位な振動提示には課題がある. また広帯域の周波数を提示可能なボイスコイル型振動子 [17], [18] は前述のとおりエネルギー効率に課題がある. 研究分野では, 接触子に固定した糸を DC モータにより巻き取る手法 [19], [20] や, 操作動作に合わせて振動しせん断力を提示する手法 [21] などがある. これらはモバイルでの振動提示を実現しているが, 提示対象が 1 本の指に限られてしまう課題がある.

モバイル環境での触覚提示にはデバイスのタッチスクリーン上での触覚提示が考えられるが、画面遮蔽を避けるために提示部を透明にする必要があり、一般に実装上の制約条件が多い。また映画鑑賞やゲームプレイに対する触覚フィードバックに画面表面を用いると画面表面に触れる必要があり、画面遮蔽や誤操作につながる。そこで、画面側面 [4], [5] や背面 [13] での触覚提示手法が提案されているが、これらの周波数特性やエネルギー効率に関する調査は行われていない。

そこで本研究は先行事例の装着型デバイス [7], [8] 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。本研究では先行事例 [7], [8] と機構はほぼ同じながら、DC モータを振動子としても用いることで広帯域の振動提示を可能とする。先行事例ではベルトによる皮膚変形提示による力覚提示を主に行っているが、本研究ではユーザは DC モータにより駆動されている PET フィルム製ベルトに触れることで幅広い帯域の振動をも知覚する。本手法ではアクチュエータはベルトおよ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、大きなタブレット端末においてもスマートフォンなどの小型デバイスと同様の強さの振動提示が可能である。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。

このような刺激提示部位の局所化を行った類似手法に、DC モータとベルトを箱に搭載し振動提示を行う展示 [22] やタッチパネル状のプレートを経した触力覚提示手法 [23] などが提案されているが、手法の周波数特性や消費電力の従来手法との比較は行われていない。またデバイス全体ではなく指が触れる一部の表面を振動させる手法は近年 Macbook (Apple Inc.) のタッチパッドで採用されている。薄い板を水平に振動させるという点で本提案手法に近いといえるが、これも周波数特性やエネルギー効率の面での利点は明らかにされていない。

3. ハードウェア

図 2, 図 3, 図 4 に作成したプロトタイプの概要を示す。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、スマートフォンのホットモック (Xperia Z2, 147 mm × 73 mm × 8.2 mm, 161 g) グリップリング (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 2, 図 3)。またベルトの移動を水平方向に限定するため、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

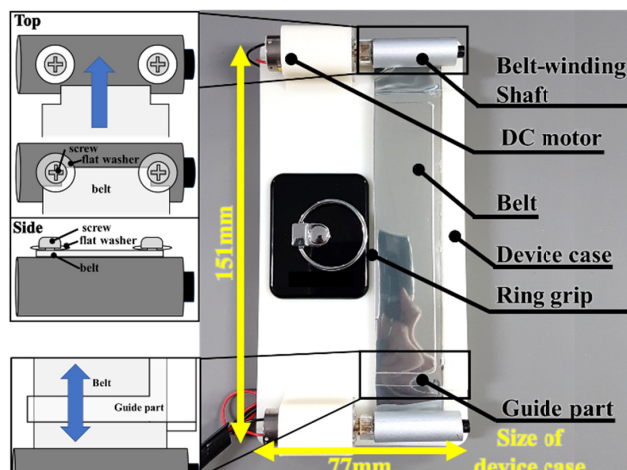


図 2 デバイス構成 (上面図)

Fig. 2 Configuration of the device (Top view).

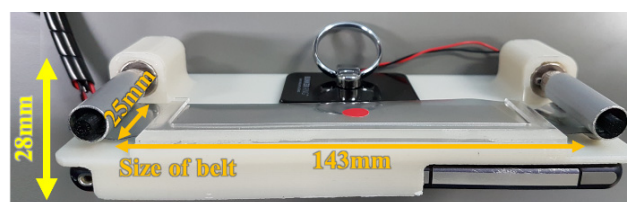


図 3 デバイス構成 (側面図)

Fig. 3 Configuration of the device (side view).



図 4 システム全体の構成

Fig. 4 Configuration of the whole system.

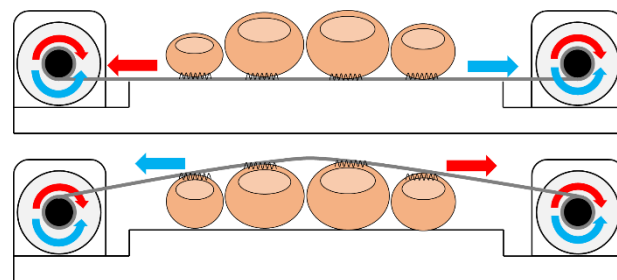


図 5 ベルトへの指接触手法. (上) ベルト上に指を載せ指腹へ振動提示を行う, (下) ベルト下に指を入れ指の甲へ振動提示を行う

Fig. 5 Methods of touching the belt. (Top) The device presents vibration to the finger pad which is placed on the belt, (bottom) The device presents vibration to the instep of the finger which is placed under the belt.

ることで行われる。

本デバイスでは振動させたベルトへの異なる指接触方法によって指腹および指の甲へ振動提示を行う。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方法 (図 5 上) がある。本指接触方法は、振動し

ているベルトによって触知覚が敏感な複数の指先へ振動提示することが可能であり、他の部位を刺激するよりも強い振動を知覚することが期待できる。

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、指の甲の皮膚へせん断方向の振動提示を行う方法（図5下）がある。本手法では軽量のPETフィルム製ベルトを振動させるが、ベルト上に指を載せる方法では指の重さによってベルトに負荷がかかり、振動が減衰することが予想される。本指接触方法ではベルト下に指を入れることで、刺激位置は指の甲のみを駆動するためベルトへの負担が少なく、減衰が抑えられることが期待できる。

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加速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に行った（図6）。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周期ごと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先行研究[9]と同じく合計1Wになるよう調整した。印加電力の計測手法はYemら[21], [24]が用いた 1Ω 抵抗とオシロスコープを用いる手法を採用した。図7のように 1Ω 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、DCモータに印加される電圧と電流を計測した。計測された電圧およ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つの指接触方法および20種類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ベルト上条件とベルト下に指を入れるベルト下条件の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。計測は著者の1人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（図6）。

計測結果を図8に示す。グラフの縦軸は計測加速度の平均振幅、横軸は出力周波数を表している。両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[21]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

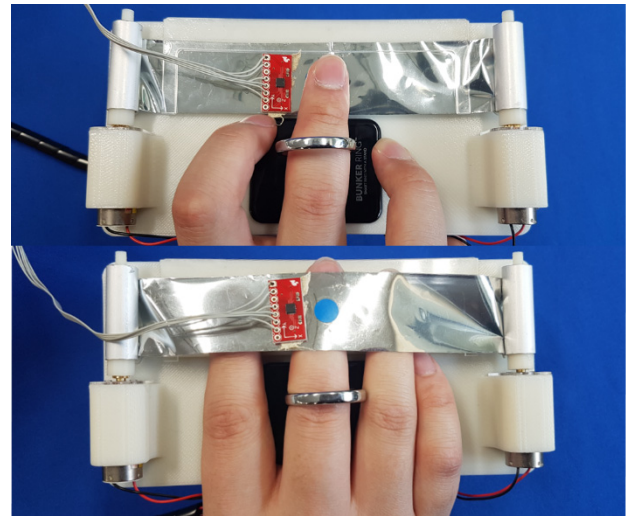


図6 計測時の加速度センサおよび手の位置

Fig. 6 Position of the accelerometer and the hand in the measurement.

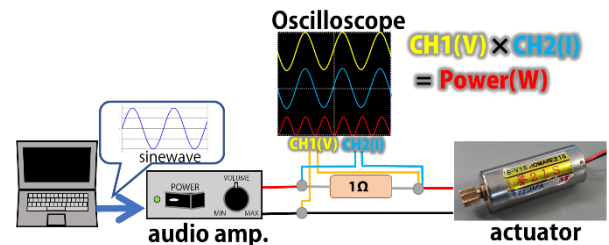


図7 電力計測設備

Fig. 7 Setup for measurement of the power.

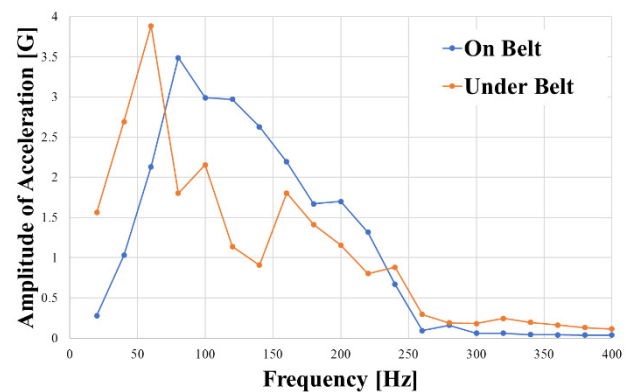


図8 各周波数でのベルトの加速度

Fig. 8 Acceleration on the belt on each frequency.

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分かる。

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

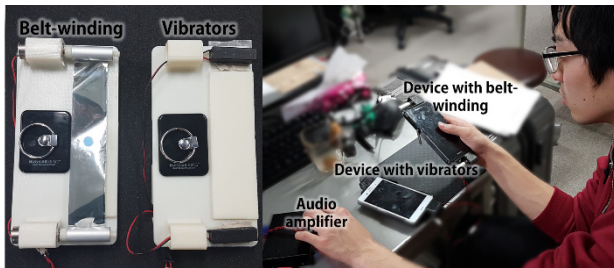


図 9 (左) 実験で使ったデバイス、(右) 実験の様子
Fig. 9 (Left) Devices used in the experiment, (Right) Overview of the experiment.

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。比較は前節で用いたベルト上に指を載せるベルト上条件とベルト下に指を入れるベルト下条件の2つの条件で行った。

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のホットモックおよびケースに、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 9 左)。提案デバイスが指全体に対して振動を提示するため、アクチュエータと指との距離の条件を同じにするために、比較用デバイスでは振動子をデバイスの両端付近に配置した。本振動子はボイスコイル型振動子であり、幅広い帯域の振動提示が可能なデバイスとして代表的である。振動子選定には出力加速度で決定したが、他の候補としてすでにコンシューマ製品に内蔵されている振動子であるアルプス社のハプティックリアクタが考えられた。しかし、ハプティックリアクタは既存の計測結果から 200 Hz 以上程度の高い周波数で強い振動を出力するのにに対し、100 Hz 以下の領域での振動加速度が弱いという結果が得られているため、我々の今回の手法との比較しやすい Haptuator Mk2 を採用した。提案デバイスと比較用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、比較用デバイスはつねに振動子の定格電力 (1.5 W) 以下の 1 W で駆動するように調整した。

被験者はベルト上条件では 9 名 (21~33 歳、男性 8 名、女性 1 名)、ベルト下条件ではベルト上条件の実験に参加した 4 名を含む 9 名 (21~33 歳、男性 8 名、女性 1 名) の研究室メンバを採用した。提示する振動は 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz の正弦波 5 種類を用意し、1 周波数あたり 5 回、各被験者合計 25 試行を行った。本デバイスで使った DC モータと既存振動子の低周波での特性を比較するために比較振動子の本来非推奨周波数の 50 Hz 未満の周波数での比較を行った。

実験手順は以下のようにした。まず被験者はランダムに

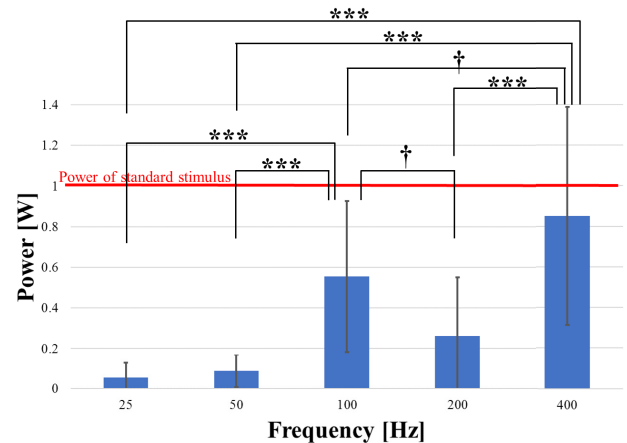


図 10 1 W で駆動している振動子とベルト上条件での回答電力の比較 (***)は $p < 0.0001$ を表している)

Fig. 10 Answered power in “on belt condition” compared with the vibrator driven in 1 W. *** represents $p < 0.0001$.

決定された周波数の振動を 1 W 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同周波数の振動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 9 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。実験に使用したオーディオアンプは 20 W+20 W の合計 40 W を出力可能であり、DC モータの定格は 17 W であったが、実験中に調整限界には達しなかった。

4.2.1 実験結果：ベルト上条件

ベルト上条件での実験結果を図 10 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の平均値、横軸は提示周波数、エラーバーは標準偏差を示している。各周波数の印加電力と基準となる比較用デバイスに加えた 1 W の電力との間で Wilcoxon の符号付き順位検定を行った結果、400 Hz では有意差は確認されなかった ($p = 0.286$) が、他のすべての周波数では有意差が確認された (すべて $p < 0.01$)。以上の結果から 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz において提案デバイスは振動子よりも省電力で振動提示ができることが示唆された。

次に全周波数のデータで分散分析を行ったところ有意差が確認された ($F(4, 32) = 23.608$, $p < 0.0001$)。事後検定として Bonferroni の補正を用いた多重比較を行った。結果、100 Hz と {25 Hz, 50 Hz}, 400 Hz と {25 Hz, 50 Hz, 200 Hz} の間で有意差を確認した ($p < 0.0001$)。また 100 Hz と 200 Hz, 400 Hz と 100 Hz の間で有意傾向が確認された。

各周波数の条件に着目すると、特に低周波 (25 Hz, 50 Hz) での条件では平均で 20% 以下の電力で振動提示が実現された。また 100 Hz において必要な電力はいったん増加し、200 Hz で再度減少した。今回用いた DC モータと振動子は Yem ら [15] が比較したものの 1 つであるが、この研究によると今回提案デバイスで採用した DC モータの共振周波

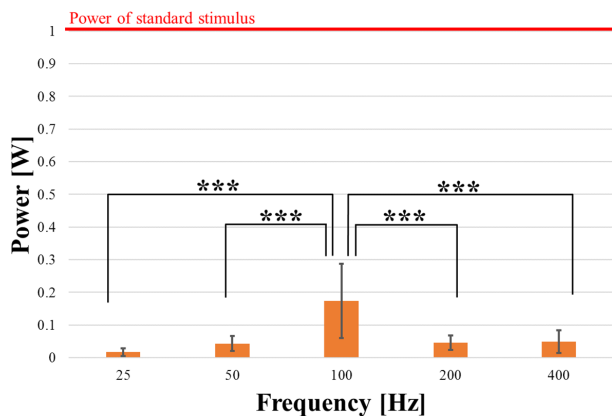


図 11 1 W で駆動している振動子とベルト下条件での回答電力の比較 (***)は $p < 0.0001$ を表している)

Fig. 11 Answered power in “under belt condition” compared with the vibrator driven in 1 W. *** represents $p < 0.0001$.

数は 50 Hz 周辺，比較用デバイスに採用した振動子の共振周波数は 100 Hz 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．

4.2.2 実験結果：ベルト下条件

ベルト下条件での実験結果を図 11 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の平均値，横軸は提示周波数，エラーバーは標準偏差を示している．各周波数の印加電力と基準となる比較用デバイスに加えた 1 W の電力との間で Wilcoxon の符号付き順位検定を行った結果，すべての周波数では有意差が確認された（すべて $p < 0.01$ ）．以上により 25 Hz～400 Hz において提案デバイスは振動子よりも省電力で振動提示可能であることが示された．

次に全周波数のデータで分散分析を行ったところ有意差が確認された ($F(4, 32) = 12.102$, $p < 0.0001$)．事後検定として Bonferroni の補正を用いた多重比較を行った．検定の結果 100 Hz と {25 Hz, 50 Hz, 200 Hz, 400 Hz} の間で有意差を確認した ($p < 0.0001$)．

他の周波数の条件と比較して 100 Hz で多くのエネルギーが必要であったのは，前節の実験と同様に振動子の共振周波数が 100 Hz 付近であったことが原因と考えられる．振動子からの振動が強かったため，同じ強さの振動感覚を得るために提案デバイスを多くのエネルギーで駆動する必要があった．

5. 本手法の制限およびアプリケーション

5.1 本手法の制限

本手法の制限として振動提示をする部位がデバイスの裏側に限定されることがあげられる．本論文で作成したプロ

トタイプでは巻取り機構をデバイスの裏側に配置したため，操作を行う指が触れる表面での振動提示が困難である．また，プロトタイプで用いたベルトは透明ではないため，表面に適用した場合画面を遮蔽してしまう．よって本手法を表面に適用するには巻取り機構の配置に気を使うことと，透明なフィルムのベルトを用意する必要がある．

また他に考えられる制限として提案デバイスがベルトを振動させる際のノイズがある．本手法ではオーディオ信号を用いて DC モータを駆動しベルトを振動させるため，接触している指だけでなく空気も振動させ音として出力されてしまう．既存の振動子でも同様の駆動音が発生するが，本手法は軽量なベルトを振動させ，振幅を稼いでいるため特にノイズが大きくなってしまう．体験によってはノイズが体験の妨げになることも考えられ，今後出力周波数をフィルタリングするなどの工夫が必要である．

5.2 本手法を用いたアプリケーション

本手法を用いたアプリケーションとして音楽鑑賞などの聴覚体験への振動刺激付与による体験向上が考えられる．近年のモバイルデバイスでの映画・音楽鑑賞の機会増加にともない，振動提示を聴覚体験の向上に応用する試みが提案されている．触覚刺激付与による音楽体験の向上はデバイスに振動子を搭載させる [25]，または身体に振動デバイスを装着し [26]，[27]，[28] 音楽信号を振動子から振動として出力することで実現されている．前章の実験により本手法は 25 Hz～400 Hz において従来手法である振動子よりも省エネルギーで振動提示が可能であることが示唆されたため，従来手法よりも省エネルギーで聴覚体験の向上が期待できる．

6. 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．また本手法では振動させたベルトへの指接触方法によって指腹および指の甲へ振動提示を行う．検証のため本手法を用いたプロトタイプを作成し出力加速度の周波数特性を計測したところ，駆動に用いた DC モータと同じ 50 Hz 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，ベルト上に指を載せる条件では 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz の正弦波において従来手法である振動子よりも省エネルギーで振動提示が可能であることが示唆された．またベルト下に指を入れる条件においても 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz の正弦波において振動子よりも省エネルギーで振動提示が可能であることが示唆された．

今後は，提案デバイス使用時のノイズ対策としての出力

周波数のフィルタリングや、提案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 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Kajimoto, H.: Skeletouch: transparent electro-tactile display for mobile surfaces, *Proc. SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies*, p.21 (2012).
- [2] Fukumoto, M. and Toshiaki, S.: Active click: Tactile feedback for touch panels, *Proc. CHI'01 Extended Abstracts*, pp.121–122 (2011).
- [3] Ivan, P., Maruyama, S. and Rekimoto, J.: Ambient touch: Designing tactile interfaces for handheld devices, *Proc. 15th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.51–60 (2002).
- [4] Jang, S., Kim, L.H., Tanner, K., Ishii, H. and Follmer, S.: Haptic Edge Display for Mobile Tactile Interaction, *Proc. CHI'16*, pp.3706–3716 (2016).
- [5] Luk, J., Pasquero, J., Little, S., MacLean, K., Levesque, V. and Hayward, V.: A Role for Haptics in Mobile Interaction: Initial Design Using a Handheld Tactile Display Prototype, *Proc. CHI'06*, pp.171–180 (2006).
- [6] 稲葉 豪, 藤田欣也: 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*, Vol.12, No.1, pp.95–102 (2007).
- [7] Minamizawa, K., Prattichizzo, D. and Tachi, S.: Simplified design of haptic display by extending one-point kinesthetic feedback to multipoint tactile feedback, *Proc. Haptics Symposium 2010*, pp.257–260 (2010).
- [8] Minamizawa, K., Fukamachi, S., Kajimoto, H., Kawakami, N. and Tachi, S.: Gravity grabber: Wearable haptic display to present virtual mass sensation, *Proc. ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies*, p.8 (2007).
- [9] Yem, V., Okazaki, R. and Kajimoto, H.: Vibrotactile and pseudo force presentation using motor rotational acceleration, *Proc. Haptics Symposium (HAPTICS 2016)*, pp.47–51 (2016).
- [10] 安藤英由樹, 渡邊淳司, 稲見昌彦, 杉本麻樹, 前田太郎: Augmented Reality のための爪装着型触覚ディスプレイの研究, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.87, No.11, pp.2025–2033 (2004).
- [11] Kaczmarek, K.A., Tyler, M.E. and Rita, P.B.: Electrotactile haptic display on the fingertips, Preliminary results, *Proc. 16th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, pp.940–941 (1994).
- [12] Kajimoto, H., Kawakami, N., Maeda, T. and Tachi, S.: Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation, *Proc. 9th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT99)* (1999).
- [13] Khurelbaatar, S., Nakai, Y., Okazaki, R., Yem, V. and Kajimoto, H.: Tactile Presentation to the Back of a Smartphone with Simultaneous Screen Operation, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems 2016*, pp.3717–3721 (2016).
- [14] Kajimoto, H., Suzuki, M. and Kanno, Y.: HamsaTouch: Tactile vision substitution with smartphone and electro-tactile display, *Proc. Extended Abstracts of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1273–1278 (2014).
- [15] Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A. and Harrison, C.: TeslaTouch: Electro-vibration for touch surfaces, *Proc. 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.283–292 (2010).
- [16] Kaczmarek, K.A., Nammi, K., Agarwal, A.K., Tyler, M.E., Haase, S.J. and Beebe, D.J.: Polarity effect in electrovibration for tactile display, *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, Vol.53, No.10, pp.2047–2054 (2006).
- [17] Tactile Labs Inc., available from <http://tactilelabs.com/>.
- [18] Alps Electric Co., available from <http://www.alps.com/e/>.
- [19] Toshima, M., Akahane, K. and Sato, M.: SPIDAR-S: Haptic Device Attached to the Smartphone, *Haptic Interaction*, pp.127–129 (2015).
- [20] Saga, S. and Raskar, R.: Simultaneous geometry and texture display based on lateral force for touchscreen, *Proc. World Haptics Conference (WHC 2013)*, pp.437–442 (2013).
- [21] Tsuchiya, S., Konyo, M., Yamada, H., Yamauchi, T., Okamoto, S. and Tadokoro, S.: Virtual Active Touch II: Vibrotactile representation of friction and a new approach to surface shape display, *Proc. Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*, pp.3184–3189 (2009).
- [22] ドラえもん科学未来展: 遠く, 遠くに手がとどく! (Gravity Grabber/テレグジスタンス研究), 入手先 http://www.miraikan.jst.go.jp/spexhibition/doraemon/index_2.html.
- [23] 則枝 真, 佐藤 誠: パネル駆動型力覚提示タッチパネルとその力覚制御手法の提案, *インタラクシオン 2012*, pp.373–378 (2012).
- [24] Yem, V., Okazaki, R. and Kajimoto, H.: Low-Frequency Vibration Actuator Using a DC Motor, *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp.317–325 (2016).
- [25] 岡崎龍太, 栗林英範, 梶本裕之: 分周刺激を用いた聴触覚変換手法による音楽体験向上, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.21, No.2, pp.335–343 (2016).
- [26] Sakuragi, R., Ikeno, S., Okazaki, R. and Kajimoto, H.: CollarBeat: Whole Body Vibrotactile Presentation via the Collarbone to Enrich Music Listening Experience, *International Conference on Artificial Reality and Telexistence - Eurographics Symposium on Virtual Environments*, pp.141–146 (2015).
- [27] Basslet: Lofelt, available from <https://lofelt.com/>.
- [28] Yamazaki, Y., Mitake, H. and Hasegawa, S.: Tension-Based Wearable Vibroacoustic Device for Music Appreciation, *EuroHaptics 2016: Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications*, pp.273–283 (2016).



中村 拓人 (学生会員)

2014 年電気通信大学総合情報学科卒業。2016 年電気通信大学大学院総合情報学専攻博士前期課程修了。同年より同大学院情報学専攻博士後期課程に在籍, 日本学術振興会特別研究員 (DC1), 現在に至る。触覚ディスプレイに関する研究に従事。



ヤェム ヴィボル

2010 年筑波大学工学システム学類卒業。2012 年同大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻博士前期課程修了。2013 年日本学術振興会特別研究員 (DC2)。2015 年同大学大学院同専攻博士後期課程修了，博

士 (工学)。2015 年電気通信大学特任研究員，現在に至る。力触覚ディスプレイ，神経電気刺激，ロボティクス，バーチャルリアリティシステム等の研究開発に従事。BMFSA, VRSJ, ACM, IEEE 各会員。



梶本 裕之

1998 年 3 月東京大学工学部計数工学科卒業。2001 年 4 月日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2003 年 3 月同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程退学，博士 (情報理工学)。2003 年 4 月東京大学助手。

2006 年 9 月電気通信大学助教授。2007 年 4 月同准教授。触覚ディスプレイ，触覚センサ，バーチャルリアリティシステム等の研究開発に従事。日本バーチャルリアリティ学会，日本ロボット学会，計測自動制御学会各会員。