

手における移動振動の識別精度の調査

日高 拓真^{1,a)} 志築 文太郎^{2,b)}

概要：スマートフォンおよびスマートウォッチなどの携帯端末において、振動に基づく通知（以降、振動通知）には、周囲に気が付かれることなく情報をユーザに知らせられるという利点がある。一方、振動通知の種類は少ないために、ユーザに多種の情報（例えば、通話の着信、メールの受信、およびカレンダーのリマインダ）を知らせることは難しい。そこで、本研究においては、携帯端末を用いるユーザが識別できる振動通知を増やすことを目的とする。このために、方向情報が付与された振動通知を用いる。また、方向を提示するために、振動の錯覚現象であるファントムセンセーションを手で提示した。今回、我々は、振動を用いた方向提示の識別精度を向上させるために、振動を提示する場所、振動の強度の変化方法、および振動を提示する時間差を元に、識別精度の調査を行った。調査の結果、正答率が最もよい条件は、振動を提示する場所が非利き手の人差し指の爪-手首、振動の強度の変化方法が対数、2つの振動を個別に提示、および振動を提示する時間が0.5秒の場合および振動を提示する場所が非利き手の人差し指の付け根-手首、振動の強度の変化方法が対数、2つの振動を個別に提示、および振動を提示する時間が1.0秒の場合の2つの条件であり、その正答率は90.28%であった。

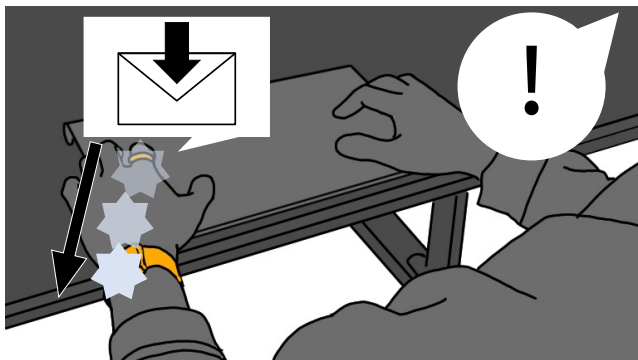


図 1 ユーザは、提示される PhS による振動の方向に基づき通知の種類を識別できる。

1. はじめに

スマートフォンおよびスマートウォッチなどの携帯端末における、振動に基づく通知（以降、振動通知）の利点として、ユーザが周囲に気付かれることなく情報を知ることができる点があげられる。一方、振動通知の種類は少ない [1,2] ために、ユーザに複数種類の情報（例として、通話の着信、メールの受信、およびカレンダーのリマインダ）を知らせることは難しい。

そこで、本研究においては、携帯端末を用いるユーザが

識別できる振動通知を増やすことを目的とする。そのために、我々は方向情報が付与された振動（以降、移動振動）による通知を用いることにした。特に、方向情報を付与するために、振動の錯覚現象であるファントムセンセーション [3]（以降、PhS）を手に対して提示する。この手法を用いることによって、例えば図 1 に示すように、デバイスを装着したユーザにメールの受信の通知を提示することを検討している。この時、ユーザには、指先から手首の方向が付与された振動通知が提示される。

これまでに我々は方向情報が付与された振動通知を提示するデバイスを作製した [4]。また、このデバイスを用いて、方向情報が付与された振動通知を提示し、その種類を識別する調査を行った。この結果、ユーザが提示された方向情報を識別する精度（以降、識別精度）が最も高い場合においても、57.4%と低かった。この原因として、我々は振動を提示する場所（以降、提示場所）それぞれにおいてユーザが知覚した振動の強度（以降、知覚強度）に差があるためと考えた。

この原因を解決するために、これまで、我々は提示場所および振動子が提示する振動の強度の組み合わせを研究室内の学生を対象に調査した [5]。今回、我々はこの調査を研究室外の学生および社会人を対象に行った。また、この結果を元に、移動振動を提示した場合における、振動の方向の識別精度を調査した。本報告においては、これらの調査の結果を示す。

¹ 筑波大学 情報理工学位プログラム

² 筑波大学 システム情報系

^{a)} hidaka@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

^{b)} shizuki@cs.tsukuba.ac.jp

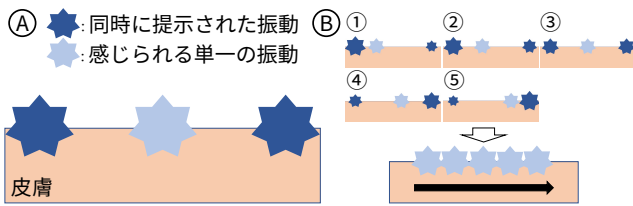


図 2 A) PhS が引き起こされる様子. B) 2 点に提示する振動の強度を変化させることにより, 振動が感知される場所を制御できる.

2. 手における PhS を用いた方向情報の提示手法

PhS [3] とは, 図 2A に示すように, 皮膚上の 2 点に対して同時に同じ強度の振動を提示した際に, ユーザはこれら 2 点の振動を 2 点の間における単一の振動として感じられる錯覚現象である. なお, 振動を提示する 2 点において, 提示する振動の強度を変えた場合, 強い振動を提示した点に近い場所においてユーザは単一の振動を感じる. これを利用することによって, 図 2B に示すように, 2 つの振動のうち, 片方を次第に大きく, もう片方を次第に小さくすることにより, 振動する 2 箇所の間を振動が移動するように感じられる振動の提示も可能である.

PhS による振動が移動する範囲を広くできれば, 多くの通知パターンを表現できると考えられる. このため, 本研究では, 離れた 2 点に振動を提示することを考えている. 具体的な提示場所の候補は, 非利き手の人差し指の爪 (以降, 爪), 人差し指の付け根 (以降, 指), および手首を想定している. 非利き手に提示する理由は, 一般的にユーザがスマートウォッチを非利き手に装着することによる. また, 爪への振動提示は, ユーザの日常生活における行動に影響を与えることなく, 感知される [6] というメリットを持つ. 指への振動提示は, スマートリングのような指輪型のデバイスを用いて提示できるメリットを持つ. なお, 他の指に比べて人差し指が最も振動を感じやすいことが先行研究 [7] により示されているため, 指のうち, 人差し指を用いることが妥当であると考えた. 手首への振動提示は, スマートウォッチのようなリストバンド型デバイスを用いて提示できるというメリットを持つ. また, 手首は提示された多くの振動を識別することが可能である [8].

3. 関連研究

本研究においては, 携帯端末を用いるユーザが識別できる振動通知を増やすことを目的とする. そのため, 本節においては, 移動振動を用いた手法および振動を用いて複数種類の通知またはフィードバックを提示する手法を示すことにより本研究を位置づける.

3.1 移動振動を用いた手法

フィードバックおよび情報を提示するために移動振動を用いた手法が提案されている. 例えば, ゲームにおけるエフェクト [9–12], 携帯端末の操作に対する振動フィードバック [13, 14], および数字または文字などの情報の提示 [8, 15, 16] に移動振動を用いた手法が挙げられる. また, 移動振動について調査した研究もある. 例えば, 皮膚を伸縮させるという触覚刺激を用いた手法の調査 [17], 前腕, 背中, または手のひらなどに対して方向を提示した場合における識別精度の違いについて調査した研究 [18, 19], および方向の識別精度を調査した研究 [20–25] などが挙げられる.

しかし, これらの手法および研究はいずれも, 前腕, 背中, 爪, および手のひらなどの 1 つの部位に対して PhS を提示している. 一方, 本研究は, 携帯端末向けに, 指および手首という部位をまたいだ PhS を用いている.

3.2 振動を用いて複数種類の通知またはフィードバックを提示する手法

振動通知に方向を付与する以外の手法を用いた通知またはフィードバックも研究されている. 例えば, 振動を提示する間隔の組み合わせによって, 通知の緊急性の違い [1], プレゼンテーションの残り時間 [2], およびアプリケーションの選択操作時における選択対象が変わったこと [26] を伝えることを試みた研究が挙げられる. また, 振動の大きさを変化させることによって, スライダの変化量を知らせること [27], および視覚障がい者に移動方向に対する障害物の有無を知らせること [28] を試みた研究もある.

振動を提示する間隔の組み合わせを用いる場合, 既存のデバイスにそのまま実装できる利点があるが, 種類を増やすためには, 振動を提示する時間を長くする必要がある. 一方, 移動振動を用いた場合, 間隔の組み合わせに基づく場合よりも, 短い時間において複数種類の通知を提示できる可能性がある. また, 大きさを変化させる手法を用いる場合, 相対的な変化を提示するため, 常に振動を提示する必要がある. このため, 通知という, 短時間の情報提示にこの手法は不向きである.

4. 実験 1: 各提示場所における適切な提示電圧の調査

移動振動による振動通知を用いるにあたって, 方向の識別精度は高い方が好ましい. そこで, 適切な提示場所の組み合わせを決定する. ここで, ユーザの手の 2 箇所振動を提示した際, 振動子に流す電圧 (以降, 提示電圧) の差が十分大きいにもかかわらず, 2 つの振動の知覚強度が同じ場合, 振動の方向を正しく感じられない可能性がある. そのため, 提示電圧の差が十分大きくなるような 2 つの振動を提示し, 知覚強度が同じである提示電圧の範囲を調査す



図 3 実験において用いたデバイス。A) 振動を提示するために用いる LRA を取り付けしたデバイス。B) デバイスを手首および指に装着した様子。

る。その後、調査した範囲が殆ど、もしくは全く重ならない提示場所の組み合わせを適切な条件として採用する。範囲の決定方法の例を挙げる。提示場所の組み合わせを手首および指とする。この場合、提示電圧が 1V である振動を手首へ提示した際、手首における知覚強度と指における知覚強度とが同じになるような指への提示電圧を決定する。これを複数人に対して複数回繰り返すことによって、範囲(以降、丁度可知差異 [29])を決定できる。なお、この調査は、前回 [5] 行った実験と同様の手順およびタスクを研究室外の学生および社会人を対象に行った。

4.1 実験システム

実験において用いるデバイスを図 3 に示す。本デバイスは、移動振動を提示するために、著者の過去の研究 [5,30,31] と同じく、リニア共振アクチュエータ (Linear Resonant Actuator. 以降, LRA) を用いる (図 3A)。具体的には LRA として LD14-002 (日本電産コバル電子株式会社) を用いた。また、参加者に対して、提示場所に LRA を固定する際、参加者の手の大きさに依存せずに LRA を皮膚と密着させる必要がある。このために、固定に面ファスナおよび 3D プリントした固定具を用いる (図 3A)。また、参加者は、このデバイスを手首、指、爪の 3 箇所のうち、2 箇所装着する (図 3B)。これらのデバイスにおける振動の制御には Analog Discovery 2^{*1}を用いる。さらに、参加者は、LRA が振動を提示する際に発生する音により提示電圧を触覚ではなく聴覚によって判断することを防ぐためにホワイトノイズが流れているヘッドフォン (Logicool, G433BK) を装着する。

4.2 参加者

参加者は研究室外の学生または社会人 4 名 (男性 2 名, 平均年齢 23.5 歳, 右利き 4 名) であった。スマートリングの使用経験を問うアンケートに対して、参加者全員が使用したことがないと回答した。スマートウォッチの使用経験を問うアンケートに対して、1 名は 1 年、残りの参加者は使用したことがないと回答した。

*1 <https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery-2/start>

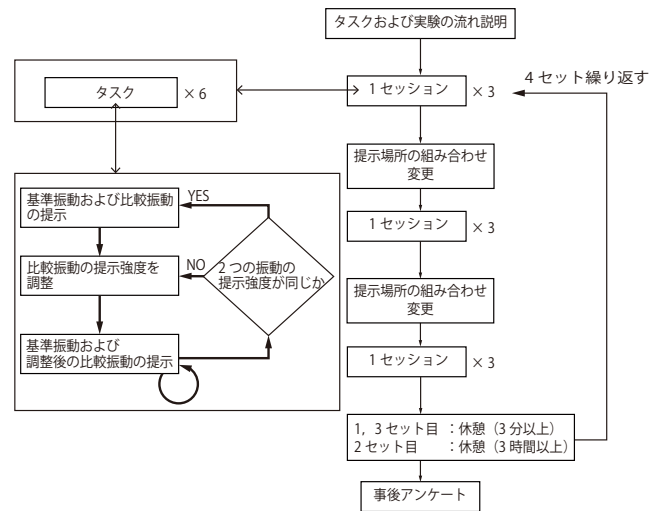


図 4 実験の流れ。

4.3 タスク

タスクは心理物理学実験における調整法 [29] に基づく。すなわち、参加者には、基準となる振動 (以降, 基準振動) および比較対象となる振動 (以降, 比較振動) の 2 つの振動が個別に提示される。参加者は、これらの振動を提示された後、比較振動の提示電圧を 2 つの振動の知覚強度が同じになるように調整する。なお、調整結果の確認のために、参加者は、基準振動および比較振動 (この提示電圧は自ら調整した強度である) を提示されることが何度でも可能である。この振動の提示は、最初に提示された 2 つの振動と同様の形式である。調整および確認を繰り返した後、比較振動と基準振動が同じ知覚強度だと判断した参加者は、この提示電圧を回答として送信して、次のタスクへ移る。

4.4 実験全体の流れ、実験の条件、および手順

実験の流れを図 4 に示す。参加者がタスクを 6 回行うことを 1 セッションとし、9 セッション分のタスクを行うことを 1 セットとする。つまり、参加者は実験を通してタスクを 216 回行う。

実験の条件を述べる。実験の条件は、提示場所の組み合わせ、振動を提示する順序、基準振動の提示場所、基準振動の提示電圧、および比較振動の初期状態の提示電圧である。

- 提示場所の組み合わせ (3 通り):
爪-指, 爪-手首, 指-手首
- 振動を提示する順序 (2 通り):
基準振動→比較振動, 比較振動→基準振動
- 基準振動の提示場所 (2 通り):
提示場所 2 箇所 (例えば, 提示場所の組み合わせが「爪, 指」の場合, 爪, 指)
- 基準振動の提示電圧 (2 通り):
4V, 1V
- 比較振動の初期状態の提示電圧 (3 通り):
0.1V, 基準振動と同強度 (例えば, 基準振動が 2V の

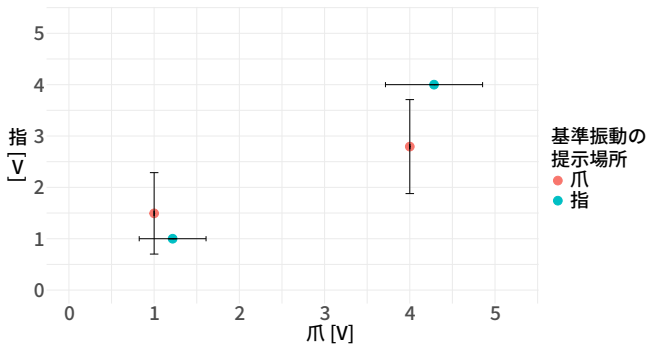


図 5 提示場所の組み合わせが爪-指の場合における調整結果。エラーバーは丁度可知差異を表している。

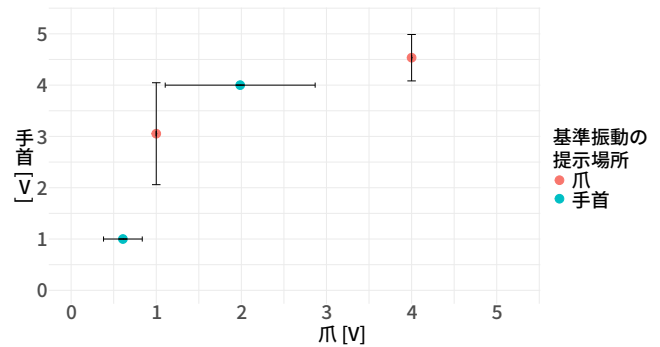


図 6 提示場所の組み合わせが爪-手首の場合における調整結果。エラーバーは丁度可知差異を表している。

場合は、2V)、5V

なお、基準振動の提示電圧を 1V および 4V にした理由として、今回使用する LRA に流せる最大電圧が 5V であることおよび調整法において、比較振動の初期状態の提示電圧は、確実に大きいもしくは小さいと感じる強度および同じと答えるはずである振動を採用する必要があることから、参加者に提示できる振動の内、最大および最小と確実に区別ができるような提示電圧を基準振動の提示電圧として採用する必要があったためである。

実験の流れを述べる。まず、参加者は、タスクのやり方および実験の流れについて説明された。その後、参加者は、ホワイトノイズが流れているヘッドフォンを装着して、タスクを行った。タスクは、基準振動の提示電圧 (2 通り) および比較振動の初期状態における提示電圧 (3 通り) を組み合わせた計 6 通りの条件においてランダムに実施された。提示場所の組み合わせ (3 通り) の条件をそれぞれ 3 回ずつ繰り返し、計 9 セッション分のタスクを実施した。なお、提示場所の組み合わせ条件の並び順は、ランダムとし、同条件のセッションは、3 回続けて実施した。1 セット目および 3 セット目のタスクを行った後、参加者は、ヘッドフォンおよびデバイスを着脱して、3 分以上の休憩を取った。また、2 セット目のタスクを行った後、参加者は、3 時間以上の休憩を取った。セットは、基準振動および比較振動の提示順序 (2 通り) および基準振動の提示場所 (2 通り) の計 4 通りの条件においてを実施した。なお、セットにおける条件の順序は、順序効果を打ち消すために、ラテン方格法を用いて、決定した。4 セット分の実験を行った後、参加者はスマートリングおよびスマートウォッチの使用経験を問う事後アンケートに回答した。また、実験の所要時間は、セット間の休憩時間を除いて、平均 180 分であった。

4.5 結果および考察

図 5、図 6、および図 7 に提示場所の組み合わせ (爪-指、爪-手首、および指-手首) ごとの結果を示す。なお、図の各点は提示場所および基準振動の提示電圧ごとにおける全ての試行の平均点であり、エラーバーは丁度可知差異で

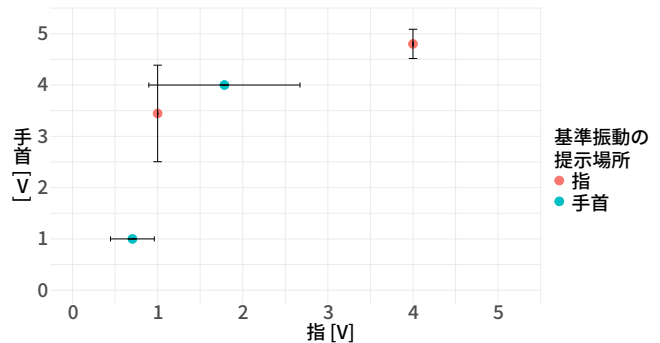


図 7 提示場所の組み合わせが指-手首の場合における調整結果。エラーバーは丁度可知差異を表している。

表 1 提示場所の組み合わせごとにおける丁度可知差異が重なっている範囲。

| 提示場所の組み合わせ | 基準振動の提示場所 | 重なり |
|------------|-----------|------------------|
| 爪-指 (図 5) | 爪 指 | 0.41 V 重なりなし |
| 爪-手首 (図 6) | 爪 手首 | 重なりなし 重なりなし |
| 指-手首 (図 7) | 指 手首 | 重なりなし 0.064 V |

ある。丁度可知差異は、標準偏差を確率 0.75 の Z 得点である 0.6745 によってかけることによって得られる。各提示場所の組み合わせごとにおける重なりを表 1 に示す。この結果より、丁度可知差異の重なりが全くない爪-手首条件、および丁度可知差異の重なりが殆どない (基準振動の提示場所が手首の場合に、0.064 V) 指-手首条件を提示場所として採用した。

5. 実験 2 : PhS による方向提示に関する調査

実験 1 の結果をもとに提示場所の組み合わせを爪および手首、指および手首に決定した。これらの提示場所の組み合わせにおける、振動が提示した方向の識別精度を調査した。なお、デバイスは、実験 1 と同じものを用いた。本節においては、この実験の詳細およびその結果を示す。また、本実験は、過去に行った実験 [4] と同じ実験手順およ

表 2 振動子に流す電圧の変化方法およびその具体的な数値.

| 振動子に流す電圧の変化方法 | 振動子に流す電圧 [V] |
|---------------|--|
| 線形 | 0.00, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.50, 4.00, 4.50, 5.00 |
| 対数 | 0.00, 2.50, 3.18, 3.59, 3.88, 4.11, 4.29, 4.45, 4.59, 4.71, 5.00 |

びタスクであり、実験において用いた条件および参加者が異なる。

5.1 参加者

参加者は研究室外の学生または社会人 12 名（男性 10 名、平均年齢 22.7 歳、右利き 10 名）であった。スマートリングの使用経験については、参加者全員が使用したことがないと回答した。スマートウォッチの使用経験については、1 名は 2 年、2 名は半年以上、残りの参加者は使用したことがないと回答した。なお、参加者の内、4 名は実験 1（4 節）と同じ参加者である。

5.2 タスク

参加者には、身体上の 2 箇所において振動が提示された。その後、振動した場所が体の外側から内側の方向または、体の内側から外側の方向のどちらに移動したかというアンケートに回答した。なお、体の外側から内側の方向とは、爪から指、爪から手首、指から手首に振動が移動するように参加者が感じたことを指す。体の内側から外側の方向とは、指から爪、手首から爪、手首から指に振動が移動するように参加者が感じたことを指す。参加者は回答する際、振動した場所がどちらに移動したかが分からない場合、分からないと回答できる。また、参加者が、振動を提示された後、アンケートに答えるまでを 1 回分のタスクとする。

振動子に流す電圧の変化条件（以降、電圧変化）は線形および対数の 2 通りである（表 2）。さらに、PhS は振動を提示するタイミングを遅延させることによって、生じる [3]。このため、2 つの振動を提示する時の時間差（以降、遅延時間）を同時（0.0 倍）、振動を提示する時間（以降、提示時間）の半分（つまり、途中から振動が提示される、以降 0.5 倍）、および提示時間と同じ（つまり、個別に提示される、以降 1.0 倍）の 3 通りとした。提示場所の組み合わせが同一の 2 箇所（A、B）の場合、A から B の方向に提示される場合、およびその逆の場合の 2 通りが考えられる。また、提示される方向の条件が 2 通りの場合、消去法によって回答されてしまう可能性がある。これを防ぐために、振動が移動しない、つまり A、B の振動が変化しないダミーの条件を加える。よって参加者は、電圧変化 2 通り × 遅延時間 3 通り ×（提示される方向情報 2 通り +

変化しないダミーの条件 1 通り）= 18 回 に対して、ランダムな順にタスクを行う。

5.3 実験の流れ

参加者が 6 条件に対してランダムな順にタスクを行うことを 1 セッションとする。この時、参加者内実験として、参加者は提示時間および提示場所の組み合わせ毎に 3 セッションずつタスクを行った。それぞれのセッションを実施する順序は、順序効果を打ち消すためにラテン方格法を用いて、決定された。なお、提示場所の組み合わせは、4 節において決定した爪-手首および指-手首である。提示時間は、500 ms、1000 ms の 2 通りである。

実験開始時、参加者はホワイトノイズが再生されたヘッドフォン（Logicool, G433BK）を装着した。ヘッドフォンを装着した後、参加者に振動が提示された。振動が提示された後、参加者はアンケートに回答した。アンケートへの回答後、すぐに次のタスクが開始された。実験を通して、参加者は、タスク 18 回 × 3 セッション × 提示場所 4 通り = 216 回を行った。また、3 セッションごとに 3 分以上の休憩を取った。参加者は休憩を取る間、デバイスおよびヘッドフォンを外した。実験の所要時間は、40 分であった。

5.4 結果および考察

図 8 に、参加者が正しく振動の方向を識別できた割合（以降、正答率）を示す。なお、エラーバーは標準偏差である。本論文において、正答数とは、PhS を用いた振動の方向を提示された際に、参加者が同じ方向を回答した回数である。このため、方奥を提示しないダミーの条件は分析から除いた。つまり、提示場所、電圧変化、遅延時間、および提示時間の組み合わせごとに行った試行回数は、参加者ごとに、6 回であった。

図 8 より、正答率が最もよい条件は、提示場所が爪-手首、電圧変化が対数、遅延時間が 1.0 倍、および提示時間が 0.5 秒の場合および提示場所が指-手首、電圧変化が対数、遅延時間が 1.0 倍、および提示時間が 1.0 秒の場合であり、その正答率は 90.28% であった。遅延時間が 0.5 倍もしくは 1.0 倍の場合は、いずれの条件においても 80% 以上であった。一方、遅延時間が 0.0 倍の場合は、65% 未満であった。このことから、遅延時間を付与することにより、移動振動の方向の識別精度は高くなると考えられる。これは、振動を提示するタイミングがずれることにより、最後まで振動していた場所を移動振動の終点と判断できるためであると考えられる。

今回の実験結果より、我々は正答率が最も良い条件の内標準偏差がより小さい、提示場所が指-手首、電圧変化が対数、遅延時間が 1.0 倍、および提示時間が 1.0 秒の条件を移動振動を提示する条件として決定した。

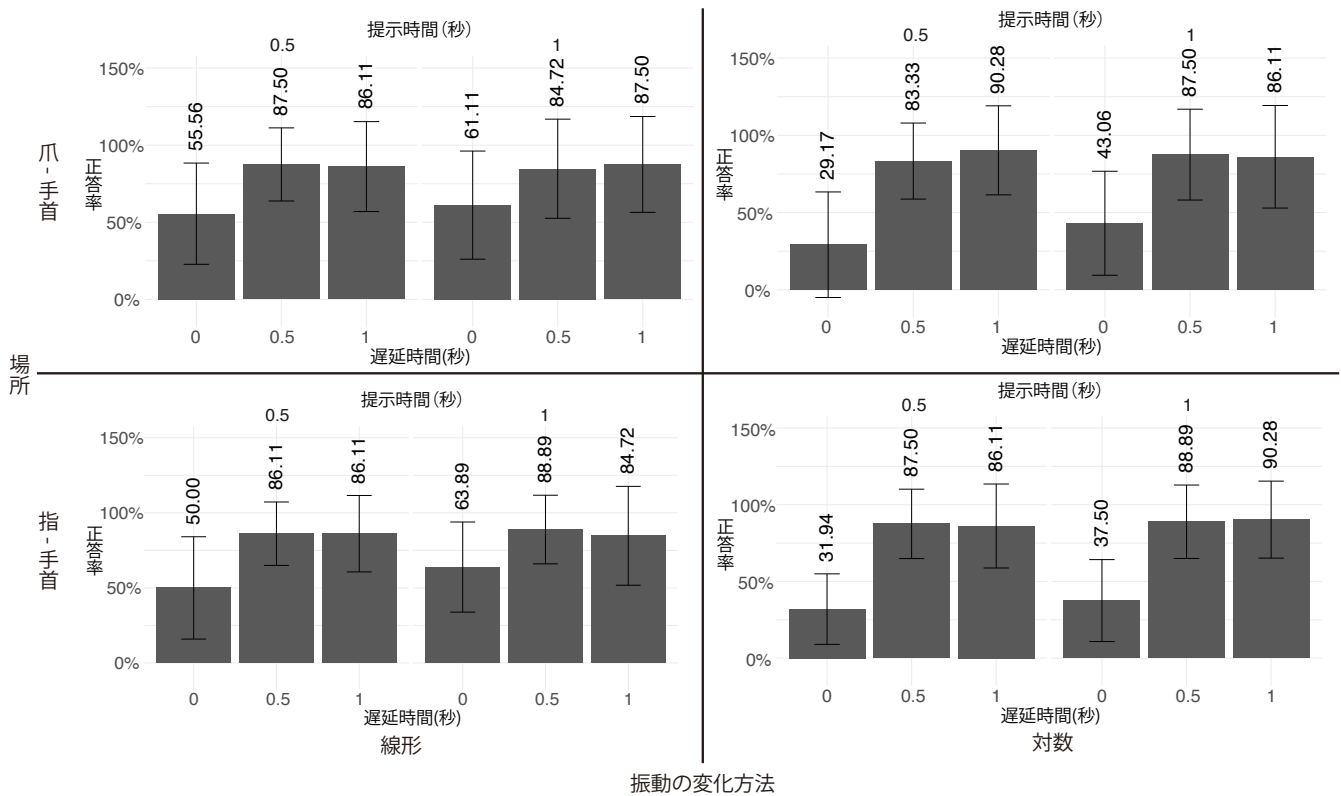


図 8 参加者が正しく振動の方向を識別できた回数。エラーバーは標準偏差である。提示場所、電圧変化、遅延時間、および提示時間の組み合わせごとに 6 回の試行が行われている。また、変化しないダミーの条件は分析から除く。

6. 議論および今後の予定

本節においては、実験結果より考えられる議論および今後の予定を述べる。

6.1 移動振動の提示場所の決定方法

移動振動を提示するための最適な場所を見つける必要がある。今回、4 節に示すように移動振動の提示場所の決定方法として、丁度可知差異の重なりが全くない、もしくは殆どない組み合わせを提示場所として決定した。これは、振動通知が提示する振動の種類を識別する際、正確な振動の方向を提示するためである。しかし、振動通知を提示する際、ユーザは振動通知を提示するためのデバイスを装着する必要がある場合が殆どである。このため、振動通知を提示するために装着するデバイスがユーザの生活の邪魔になることは避けるべきである。そこで、移動振動を提示するためのデバイスをユーザの指および手首または爪および手首に装着しながら、日常生活を送ってもらうことにより、デバイスとしてより適しているデバイスの装着場所を決定することを考える。

6.2 作製した振動通知の評価方法

今後、本稿において作製した振動通知および既存の振動

通知を比較した後、作製した振動通知を評価する予定である。比較および評価方法として、振動通知を用いる実際の使用状況を再現した実験を実施する予定である。この実験における評価指標として、参加者が振動通知を提示された場合において、参加者が振動通知の通知内容を識別する速度およびその精度を用いる。また、作製した振動通知および既存の振動通知の好みをリッカード評価を用いて評価する。

7. おわりに

本研究は、携帯端末を用いるユーザが識別できる振動通知を増やすことを目的とする。このために、方向情報が付与された振動通知を用いた。また、方向を提示するために、振動の錯覚現象である PhS を手に提示することを検討した。方向を提示した際、ユーザが正しい方向を識別するために、適切な振動を提示する場所を調査した。また、この調査結果を用いて、ユーザが移動振動の方向の識別精度を我々は調査し、移動振動を提示するための条件を決定した。今後、本稿において作製した振動通知および既存の振動通知を比較した後、作製した振動通知を評価する予定である。

参考文献

- [1] Saket, B., Prasajo, C., Huang, Y. and Zhao, S.: Designing an Effective Vibration-Based Notification Interface for Mobile Phones, *Proceedings of the 2013 Conference on Computer Supported Cooperative Work, CSCW '13*, Association for Computing Machinery, pp. 149–1504 (online), DOI: 10.1145/2441776.2441946 (2013).
- [2] Tam, D., MacLean, K. E., McGrenere, J. and Kuchenbecker, K. J.: The Design and Field Observation of a Haptic Notification System for Timing Awareness During Oral Presentations, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1689–1698 (online), DOI: 10.1145/2470654.2466223 (2013).
- [3] Alles, D. S.: Information Transmission by Phantom Sensations, *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 85–91 (online), DOI: 10.1109/TMMS.1970.299967 (1970).
- [4] Hidaka, T., Sei, Y. and Shizuki, B.: Pilot Study on Notification Using Phantom Sensation on Hand, *Proceedings of Asian CHI Symposium 2021*, Asian CHI Symposium 2021, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 157–159 (online), DOI: 10.1145/3429360.3468202 (2021).
- [5] 日高拓真, 志築文太郎: 振動を用いた方向提示における識別精度の予備調査, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), Vol. 2022-HCI-199, No. 38, pp. 1–6 (2022).
- [6] Ando, H., Kusachi, E. and Watanabe, J.: Nail-Mounted Tactile Display for Boundary/Texture Augmentation, *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, ACE '07*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 292–293 (online), DOI: 10.1145/1255047.1255131 (2007).
- [7] 水上陽介, 澤田秀之: 薄型触覚呈示デバイスによる高次知覚を利用した触覚情報呈示, 情報処理学会インタラクション論文集, pp. 121–128 (2007).
- [8] Matscheko, M., Ferscha, A., Riener, A. and Lehner, M.: Tactor Placement in Wrist Worn Wearables, *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers 2010, ISWC '10*, IEEE Computer Society, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1109/ISWC.2010.5665867 (2010).
- [9] Chu, S.-Y., Cheng, Y.-T., Lin, S. C., Huang, Y.-W., Chen, Y. and Chen, M. Y.: MotionRing: Creating Illusory Tactile Motion around the Head Using 360° Vibrotactile Headbands, *Proceedings of The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '21*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 724–731 (online), DOI: 10.1145/3472749.3474781 (2021).
- [10] Israr, A. and Poupyrev, I.: Exploring Surround Haptics Displays, *Proceedings of Extended Abstracts of the 2010 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '10*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 4171–4176 (online), DOI: 10.1145/1753846.1754121 (2010).
- [11] Israr, A. and Poupyrev, I.: Tactile Brush: Drawing on Skin With a Tactile Grid Display, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 2019–2028 (online), DOI: 10.1145/1978942.1979235 (2011).
- [12] Israr, A., Kim, S.-C., Stec, J. and Poupyrev, I.: Surround Haptics: Tactile Feedback for Immersive Gaming Experiences, *Proceedings of Extended Abstracts of the 2012 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '12*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1087–1090 (online), DOI: 10.1145/2212776.2212392 (2012).
- [13] Gupta, A., Pietrzak, T., Roussel, N. and Balakrishnan, R.: Direct Manipulation in Tactile Displays, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 3683–3693 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858161 (2016).
- [14] Yatani, K. and Truong, K. N.: SemFeel: A User Interface With Semantic Tactile Feedback for Mobile Touch-Screen Devices, *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '09*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 111–120 (online), DOI: 10.1145/1622176.1622198 (2009).
- [15] Hsieh, M.-J., Liang, R.-H. and Chen, B.-Y.: NailTactors: Eyes-Free Spatial Output Using a Nail-Mounted Tactor Array, *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '16*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 29–34 (online), DOI: 10.1145/2935334.2935358 (2016).
- [16] Meier, A., Matthies, D. J. C., Urban, B. and Wettsch, R.: Exploring Vibrotactile Feedback on the Body and Foot for the Purpose of Pedestrian Navigation, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Sensor-Based Activity Recognition and Interaction, iWOAR '15*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–11 (online), DOI: 10.1145/2790044.2790051 (2015).
- [17] Horie, A., Kashino, Z., Shimobayashi, H. and Inami, M.: Two-Dimensional Moving Phantom Sensation Created by Rotational Skin Stretch Distribution, *Proceedings of 2021 IEEE World Haptics Conference, WHC '21*, IEEE, pp. 139–144 (online), DOI: 10.1109/WHC49131.2021.9517252 (2021).
- [18] Elsayed, H., Weigel, M., Müller, F., Schmitz, M., Marky, K., Günther, S., Riemann, J. and Mühlhäuser, M.: VibroMap: Understanding the Spacing of Vibrotactile Actuators Across the Body, *Proceedings of the ACM Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, Vol. 4, No. 4*, pp. 1–16 (online), DOI: 10.1145/3432189 (2020).
- [19] Alvina, J., Zhao, S., Perrault, S. T., Azh, M., Roumen, T. and Fjeld, M.: OmniVib: Towards Cross-Body Spatiotemporal Vibrotactile Notifications for Mobile Phones, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 2487–2496 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702341 (2015).
- [20] Kim, T., Shim, Y. A. and Lee, G.: Heterogeneous Stroke: Using Unique Vibration Cues to Improve the Wrist-Worn Spatiotemporal Tactile Display, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '21*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3411764.3445448 (2021).
- [21] Rahal, L., Cha, J., El Saddik, A., Kammerl, J. and Steinbach, E.: Investigating the Influence of Temporal Intensity Changes on Apparent Movement Phenomenon, *Proceedings of 2009 IEEE International Conference*

- on *Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurements Systems*, VECIMS '09, IEEE, pp. 310–313 (online), DOI: 10.1109/VECIMS.2009.5068914 (2009).
- [22] Kang, J., Lee, J., Kim, H., Cho, K., Wang, S. and Ryu, J.: Smooth Vibrotactile Flow Generation Using Two Piezoelectric Actuators, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 5, No. 1, pp. 21–32 (online), DOI: 10.1109/TOH.2012.1 (2012).
- [23] Novich, S. D. and Eagleman, D. M.: Using Space and Time to Encode Vibrotactile Information: Toward an Estimate of the Skin's Achievable Throughput, *Experimental Brain Research*, Vol. 233, No. 10, pp. 2777–2788 (online), DOI: 10.1007/s00221-015-4346-1 (2015).
- [24] Park, G. and Choi, S.: Tactile Information Transmission by 2D Stationary Phantom Sensations, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–12 (online), DOI: 10.1145/3173574.3173832 (2018).
- [25] Jongman Seo and Seungmoon Choi: Perceptual Analysis of Vibrotactile Flows on a Mobile Device, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 6, No. 4, pp. 522–527 (online), DOI: 10.1109/TOH.2013.24 (2013).
- [26] Liao, Y.-C., Chen, Y.-C., Chan, L. and Chen, B.-Y.: Dwell+: Multi-Level Mode Selection Using Vibrotactile Cues, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 5–16 (online), DOI: 10.1145/3126594.3126627 (2017).
- [27] Bernard, C., Monnoyer, J., Ystad, S. and Wiertlewski, M.: Eyes-Off Your Fingers: Gradual Surface Haptic Feedback Improves Eyes-Free Touchscreen Interaction, *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3491102.3501872 (2022).
- [28] Pariti, J., Tibdewal, V. and Oh, T.: Intelligent Mobility Cane - Lessons Learned from Evaluation of Obstacle Notification System Using a Haptic Approach, *Proceedings of Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1145/3334480.3375217 (2020).
- [29] 黒田剛士, 蓮尾絵美: 早わかり心理物理学実験 (やさしい解説), *日本音響学会誌*, Vol. 69, No. 12, pp. 632–637 (2013).
- [30] 日高拓真, 志築文太郎: 通知としてファントムセンセーションを提示するデバイスの試作, 第 29 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, WISS2021, 日本ソフトウェア科学会 (2021).
- [31] 日高拓真, 志築文太郎: 手における移動振動を用いた通知の試作, 第 30 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, WISS2022, 日本ソフトウェア科学会 (2022).