

筑波大学大学院博士課程  
理工情報生命学院  
システム情報工学研究群修士論文

# 手における移動振動の識別精度の基礎調査

日高 拓真  
修士（工学）  
（情報理工学位プログラム）

指導教員 志築 文太郎

2023年3月

## 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、移動振動の方向の識別精度が高くなる条件として、遅延時間が0.5倍（提示時間が0.5秒の場合、0.25秒、提示時間が1.0秒の場合、0.5秒）、または1.0倍（提示時間が0.5秒の場合、0.5秒、提示時間が1.0秒の場合、1.0秒）であり、電圧変化が対数である場合であった。なお、最も高い方向の識別精度は、100.0%であった。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	振動を用いて情報を提示する手法	1
1.2	振動を用いて方向情報を提示する手法	2
1.3	目的とアプローチ	2
1.4	先行研究および課題	4
1.5	本研究の方針	5
1.6	貢献	5
1.7	本論文の構成	5
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>6</b>
2.1	振動を用いて情報を提示する手法	6
2.1.1	移動振動を用いた手法	6
2.1.2	移動振動以外を用いた手法	7
2.2	振動を用いた情報提示のための調査	7
2.3	移動振動の調査	8
2.4	振動以外を用いた通知およびその調査	8
<b>第3章</b>	<b>手における PhS による方向刺激</b>	<b>10</b>
3.1	振動通知の提示場所の候補	10
3.2	実装したデバイス	10
3.3	デバイスを用いて提示する移動振動	12
<b>第4章</b>	<b>実験1：各提示場所における適切な提示電圧の調査</b>	<b>13</b>
4.1	適切な提示場所の組み合わせを決定するための手法	13
4.2	実験デバイス	15
4.3	参加者	15
4.4	タスク	15
4.5	実験の条件および実験全体の流れ	15
4.6	結果	18
<b>第5章</b>	<b>学会におけるデモ発表およびその感想</b>	<b>21</b>
5.1	実装したシステムの概要	21

5.2	デモの発表内容 . . . . .	21
5.3	デモ参加者の感想 . . . . .	21
<b>第 6 章</b>	<b>実験 2 : PhS による方向提示に関する調査</b>	<b>24</b>
6.1	参加者 . . . . .	24
6.2	タスク . . . . .	24
6.3	実験の流れ . . . . .	26
6.4	結果および考察 . . . . .	26
<b>第 7 章</b>	<b>議論および今後の課題</b>	<b>31</b>
7.1	移動振動の提示場所の決定方法 . . . . .	31
7.2	作製した振動通知の評価方法 . . . . .	31
7.3	振動子を増やすことによる移動振動の増加 . . . . .	31
7.4	年齢による PhS の感知しやすさ . . . . .	32
<b>第 8 章</b>	<b>おわりに</b>	<b>33</b>
	謝辞	34
	参考文献	35
<b>付 録 A</b>	<b>実験の際に用いた各種書類</b>	<b>43</b>
A.1	実験計画書 . . . . .	44
A.2	実験 1 の同意書 . . . . .	59
A.3	実験 2 の同意書 . . . . .	63
<b>付 録 B</b>	<b>6.4 節における訂正前の実験</b>	<b>67</b>
B.1	差し替え前との差分 . . . . .	67
B.2	参加者 . . . . .	67
B.3	結果および考察 . . . . .	67
B.4	混同行列の詳細な結果 . . . . .	70

# 目次

1.1	PhS および移動振動が引き起こされる様子. 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, 移動振動が引き起こされる. . . . .	2
1.2	移動振動による通知を提示した様子. 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. . . . .	3
1.3	先行研究において, 移動振動を提示した場合の参加者が正しい方向を識別した精度. エラーバーは標準偏差を表す. . . . .	3
1.4	先行研究において, 参加者が回答した方向の割合. . . . .	4
3.1	実装したデバイス. A) 振動を提示するために用いる LRA を取り付けたデバイス. B) デバイスを手首および指に装着した様子. . . . .	11
3.2	実装したデバイスを用いて提示される移動振動の例. A および B は方向を提示する. C および D は方向を提示した後, 1 箇所振動を提示する. . . . .	11
4.1	爪へ 1.0V の振動を提示した場合における, ユーザが爪および指への振動が同じ強度であると判断した指への提示強度の平均値およびその範囲の例. エラーバーが丁度可知差異を示す. . . . .	14
4.2	爪へ 1.0V および 4.0V の振動を提示した場合における, それぞれの平均値および丁度可知差異の例. エラーバーが丁度可知差異を表す. 例えば, 指に 2.0V の振動を提示した場合, 爪に 1.0V の振動または 4.0V の振動を提示した場合どちらも同じ振動であると認識する可能性があることを示す. . . . .	14
4.3	実験において用いたアプリケーションの画面. 参加者は, 中央のスライダーおよび「+」, 「-」ボタンを用いて, 基準振動の提示電圧を調整できる. また, 中央の「振動を提示する」ボタンを押すことによって, 基準振動および比較振動を提示されることができる. . . . .	16
4.4	実験 1 の流れ. . . . .	17
4.5	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. . . . .	19
4.6	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. . . . .	19
4.7	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. . . . .	20

5.1	デモにおいて用いたシステム. 3.2節において示したデバイスに加えて, スマートウォッチを用いた. スマートウォッチおよび手首に取り付けた振動子は, 将来的には統合することを考える. . . . .	22
5.2	デモにおいて実際に提示した振動通知およびその通知の内容の例. a) メールの受信通知. 指から手首への移動振動が提示される. b) メールの送信通知. 手首から指への移動振動が提示される. c) メッセージの受信通知. 指から手首への移動振動の提示後, 手首のみの振動が提示される. d) アラーム. 手首から指への移動振動および指から手首への移動振動の繰り返しが提示される. .	22
6.1	実験2において用いたアプリケーションの画面. 参加者は, 画面中央にある手の画像および矢印を見ながら, ラジオボタンを用いて「方向1」, 「方向2」, および「分からない」の選択肢を選択する. その後, 右上にある回答ボタンを用いて, 回答を送信する. . . . .	25
6.2	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を表している. 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. .	28
B.1	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を表している. 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. .	69

# 目次

4.1	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. . . . .	20
5.1	デモ参加者から頂いた感想の一覧. . . . .	23
6.1	振動子にかかる電圧の変化方法およびその具体的な数値. . . . .	26
6.2	参加者に提示した方向条件（ダミー条件である移動しない条件を含む）および参加者の回答の混同行列. なお，方向1，方向2とは，図6.1に示す矢印の方向を指す. . . . .	27
6.3	遅延時間がない場合，つまり遅延時間が0.0倍の場合の移動振動を提示した際における，参加者に提示した方向条件（ダミー条件である移動しない条件を含む）および参加者の回答の混同行列. なお，方向1，方向2とは，図6.1に示す矢印の方向を指す. . . . .	27
6.4	遅延時間がある場合，つまり遅延時間が0.5倍および1.0倍の場合の移動振動を提示した際における，参加者に提示した方向条件および参加者の回答の混同行列. なお，方向1，方向2とは，図6.1に示す矢印の方向を指し，移動しない振動は提示していない. . . . .	27
6.5	アンケートとして，参加者がPhSを感じた提示場所および提示時間の組み合わせの順位. 縦軸が組み合わせ，横軸がアンケート項目を示す. . . . .	27
B.1	参加者に提示した方向条件（ダミー条件である移動しない条件を含む）および参加者の回答の混同行列. なお，方向1，方向2とは，図6.1に示す矢印の方向を指す. . . . .	68
B.2	提示場所が指-手首，遅延時間が0s，提示時間が0.5s，および電圧変化が線形の場合における混同行列. . . . .	70
B.3	提示場所が指-手首，遅延時間が0s，提示時間が0.5s，および電圧変化が対数の場合における混同行列. . . . .	70
B.4	提示場所が指-手首，遅延時間が0s，提示時間が1.0s，および電圧変化が線形の場合における混同行列. . . . .	70
B.5	提示場所が指-手首，遅延時間が0s，提示時間が1.0s，および電圧変化が対数の場合における混同行列. . . . .	71
B.6	提示場所が指-手首，遅延時間が0.25s，提示時間が0.5s，および電圧変化が線形の場合における混同行列. . . . .	71

B.7	提示場所が指-手首, 遅延時間が 0.25 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列. . . . .	71
B.8	提示場所が指-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列. . . . .	71
B.9	提示場所が指-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列. . . . .	71
B.10	提示場所が指-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列. . . . .	72
B.11	提示場所が指-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列. . . . .	72
B.12	提示場所が指-手首, 遅延時間が 1.0 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列. . . . .	72
B.13	提示場所が指-手首, 遅延時間が 1.0 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列. . . . .	72
B.14	提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列. . . . .	72
B.15	提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列. . . . .	73
B.16	提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列. . . . .	73
B.17	提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列. . . . .	73
B.18	提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0.25 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列. . . . .	73
B.19	提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0.25 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列. . . . .	73
B.20	提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列. . . . .	74
B.21	提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列. . . . .	74
B.22	提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列. . . . .	74
B.23	提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列. . . . .	74
B.24	提示場所が爪-手首, 遅延時間が 1.0 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列. . . . .	74
B.25	提示場所が爪-手首, 遅延時間が 1.0 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列. . . . .	75



# 第1章 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情報を知らせる仕組みとして、通知システムが用いられている。通知システムがユーザに知らせる情報の例として、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が挙げられる。一般的に通知システムは、聴覚、視覚、および触覚を通してユーザに情報を知らせる。

聴覚、視覚、またはその両方を通した通知を用いる場合、通知システムが周囲への迷惑となる状況が考えられる。例えば、映画の上映中、会議中、講義の受講中、および会話中などがあげられる。その際、ユーザには、携帯端末を音が出ない設定にする、または画面を机に伏せるといった対応が求められる。一方、触覚を通した通知には、ユーザが周囲に気付かれることなく通知を受け取れるという長所がある。これは、聴覚もしくは視覚を通した通知とは異なり、通知を提示する装置を装着しているユーザにのみ情報を知らせることができる [HLC16] ためである。そこで、本研究においては、携帯端末に一般的に備わっている、振動による触覚を通した通知（以降、振動通知）に着目する。

しかし、携帯端末に用いられる振動通知には、種類が少ない [SPHZ13, TMMK13] という課題がある。聴覚を通した通知は、律動、旋律、および大きさなどを組み合わせることにより、複数種類の通知を表現できる。視覚を通した通知は、文字、色、および画像などを組み合わせることにより、複数種類の通知を表現できる。一方、振動通知も、強度、振動を提示する場所、および振動を提示する間隔を組み合わせることにより、複数種類の通知を表現できる可能性がある。

## 1.1 振動を用いて情報を提示する手法

振動のみを用いて、複数種類の情報を表現したものがある。例えば、振動の強度を変化させたもの [BMYW22, PTO20]、振動を提示する場所を変えたもの [桎徳 18, AZP<sup>+</sup>15, HLC16, LCL<sup>+</sup>16]、および振動を提示する間隔の組み合わせによって表現したもの [SPHZ13, TMMK13, LCCC17] が挙げられる。

本研究においては、振動に方向情報を付与できるファントムセンセーション [All70] (Phantom Sensation, 以降、PhS) と呼ばれる振動の錯覚現象を用いることを検討した。

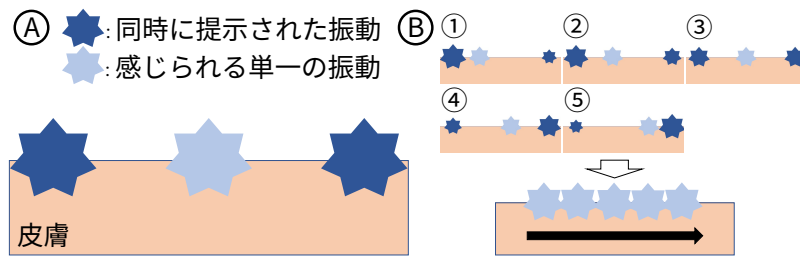


図 1.1: PhS および移動振動が引き起こされる様子. A) PhS が引き起こされる様子. B) 2 点に提示する振動の強度を変化させることにより, 移動振動が引き起こされる.

## 1.2 振動を用いて方向情報を提示する手法

方向情報を付与した振動（以降, 移動振動）を提示するために, PhS を用いる. PhS [All70] とは, 図 1.1A 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 1.1B 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. また, 振動を提示するタイミングを遅延させることによって, 移動振動を提示することができることが分かっている [All70].

我々は, 移動振動の提示にスマートウォッチを用いることを検討する. スマートウォッチは, スマートフォンのような把持して使用するデバイスとは異なり, 常に手首にデバイスを装着して使用する. また, 振動通知を提示するためには, 振動を提示するデバイスを常にユーザが装着する必要がある. これらのことから, スマートウォッチは振動通知を提示するデバイスとして適していると考えられる.

## 1.3 目的とアプローチ

本研究の目的は, 携帯端末を用いるユーザが識別できる振動通知の種類を増やすことである. そのために, 我々は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 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 1.2 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.

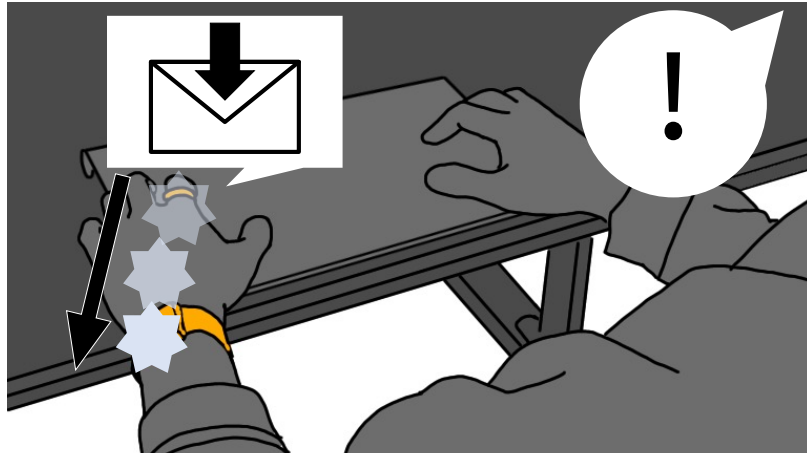


図 1.2: 移動振動による通知を提示した様子. ユーザは, 提示される PhS による振動の方向に基づき通知の種類を識別できる.

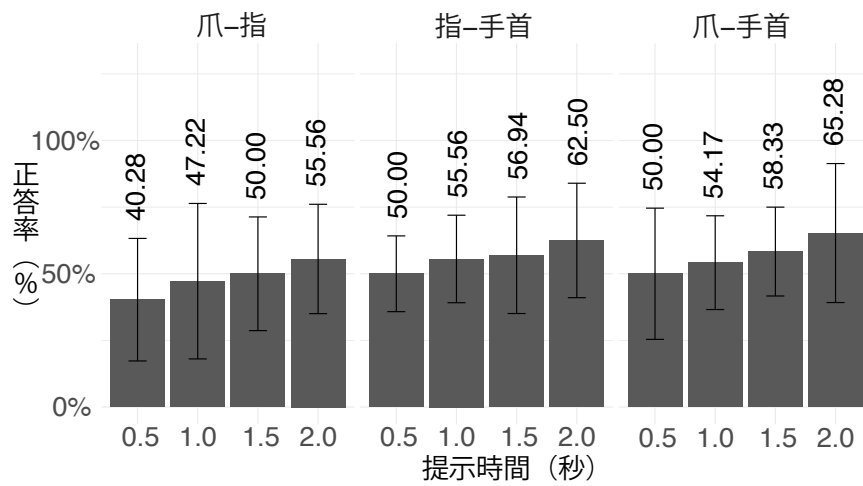


図 1.3: 先行研究において, 移動振動を提示した場合の参加者が正しい方向を識別した精度. エラーバーは標準偏差を表す.

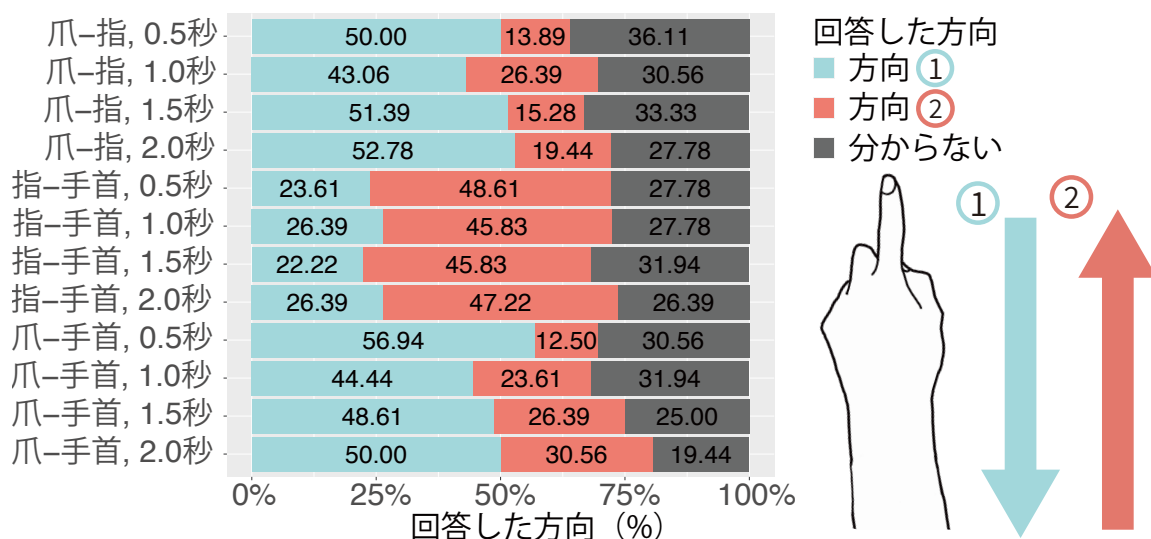


図 1.4: 先行研究において、参加者が回答した方向の割合。

## 1.4 先行研究および課題

著者が過去に行った研究（以降、先行研究）[HSS21]においては、通知を提示するためのデバイスを実装し、調査において、参加者に移動振動を提示した場合に、振動が移動する方向を正しく識別する精度（以降、識別精度）を測定した。図 1.3 に調査した結果を示す。なお、調査において提示した移動振動の条件を以下に示す。

- 振動を提示する場所（以降、提示場所）の組み合わせ（3通り）：  
非利き手の人差し指の爪（以降、爪）-非利き手の人差し指の付け根（以降、指）、爪-非利き手の手首（以降、手首）、指-手首
- 振動を提示する時間（以降、提示時間）（4通り）：  
500 ms, 1000 ms, 1500 ms, 2000 ms

調査結果より、識別精度は最も良い値においても、57.4%と低かった。このことから、参加者はこのデバイスを用いて通知を提示された場合、正確に提示された通知の種類を識別することが困難であると考えた。そこで、識別精度が低い原因を調査するため、参加者が振動を提示した方向（以降、提示方向）の割合を分析した。図 1.4 に分析した結果を示す。なお、調査において、参加者は爪から手首方向（例えば、提示場所の組み合わせが指-手首の場合、指から手首方向の移動振動を提示）、手首から爪方向、および分からないの3択の中から選択した。この結果、参加者が回答した方向に偏りがあることが分かった。これは、各提示場所の組み合わせにおいてそれぞれの振動子に流す電圧が等しい場合も、提示場所ごとの振動を感じる強度（以降、知覚強度）に差があるためと考えた。

## 1.5 本研究の方針

先行研究 [HSS21] において、各提示場所の組み合わせにおいて知覚強度に差がある可能性が示された。そこで、本研究においては、最初に、知覚強度が等しくなるような振動を提示する強度（以降、提示強度）を調査した。その後、この調査結果を用いて、先行研究と同様の実験を新たな実験条件を追加して再度行い、識別精度が向上していることを確認した。

## 1.6 貢献

本研究の貢献は以下の通りである。

- 移動振動を提示することによる振動通知手法を考案した。
- 移動振動の識別精度を向上させるために振動を提示するのに適した場所を調査した。
- 先行研究 [HSS21] において行った移動振動の方向識別精度の調査を新たな実験条件を追加して再度行った結果、識別精度の最大値が先行研究より 34.72%向上した。

## 1.7 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第 1 章においては、本研究の背景、目的とアプローチ、および貢献を示す。第 2 章においては、本研究に関連する研究を述べ、本研究の位置付けを示す。第 3 章においては、本研究にて検討する手における PhS による方向刺激について述べる。第 4 章においては、PhS を提示するにあたって適切な提示場所を調査した結果を示す。第 5 章においては、本研究のデモ発表を行った結果を示す。第 6 章においては、第 4 章の結果を元に、移動振動を提示した際の方向の識別精度を調査した結果を述べる。第 7 章においては、調査内容および調査した結果について議論し、今後の課題を述べる。第 8 章においては、本研究の結論を述べる。

## 第2章 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、振動を用いて情報を提示する手法、振動を用いて情報を提示するための調査、ならびに振動以外を用いた通知およびその調査を示すことにより本研究を位置づける。

### 2.1 振動を用いて情報を提示する手法

本節において、振動を用いて情報を提示する手法として、移動振動を用いた手法、移動振動以外を用いた手法を示す。

#### 2.1.1 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。Chuら [CCL<sup>+</sup>21] は、頭部に移動振動を提示することにより、風またはボールが横切るようなゲームエフェクトを提示した。Ali および Ivan [IKSP12] は、背中に点または面を表現した移動振動を提示することにより、運転時の車の揺れを表現したゲームエフェクトを作製した。Guptaら [GPRB16] はリストバンドに振動子を取り付け、スマートウォッチの操作に対して PhS を用いたフィードバックを提示させる手法を提案した。Yatani および Truong [YT09] はユーザによる携帯端末の操作に対して、携帯端末に取り付けた振動子による PhS を用いたフィードバックを提示させる手法を提案した。Quintal および Lima [QL22] は運転中の空中操作における触覚フィードバックとして、ハンドルに取り付けた振動子を用いて移動振動を提示する手法を提案した。Matschekoら [MFRL10] は腕時計に取り付けた振動子によって引き起こされる PhS を用いて現在時刻を示す手法を提案した。Anitaら [MMUW15] は足に振動を提示することによって道案内を行うデバイスを作製した。白井ら [白井97] は、振動子が組み込まれた筒状のデバイスを作製し、ユーザに力のかかる方向を感知させた。Maら [MLYZ19] は、移動振動を手首に対して提示することにより、運転中のガイドおよび緊急信号を提示する手法を提案した。

これらの手法は、移動振動を用いることにより、ゲームエフェクト、携帯端末の操作に対するフィードバック、または文字または時刻のような情報の提示を行っている。本研究においては、移動振動を振動通知に用いることを検討する。

### 2.1.2 移動振動以外を用いた手法

移動振動以外の手法を用いて複数種類の振動を提示したものがある。Saketら [SPHZ13] は2種類の振動を提示する時間および2種類の振動を停止する時間を組み合わせた通知を考案した。林ら [枉徳18] は自転車の運転中において、臀部に振動の周波数、振動を提示する間隔、および振動を提示する場所を組み合わせた振動を提示する通知を考案した。Tamら [TMMK13] はプレゼンテーションによる発表時に、残り時間を振動によって提示するシステムを作製した。Liaoら [LCCC17] はスマートフォンに対して長押し操作を行い、押している時間に応じてアプリケーションを選択する機能を実装した。この機能において、システムは対象アプリケーションの切り替え時に振動を提示する、つまり振動回数によって選択アプリケーションを示した。Jessalynら [AZP<sup>+</sup>15] は手のひら、腕、腰、および太ももに対して、2×2の振動子アレイの提示順によって、8つのパターンを表現した。Hsiehら [HLC16] は1つの爪に取り付けた4つの振動子の提示順序によってユーザに0から9までの数字を提示する手法を提案した。Bernardら [BMYW22] はスライダーを使用する際、スライダーを振動させて、その強度を変化させることによって、スライドの位置を示す手法を提案した。Liaoら [LCL<sup>+</sup>16] は手首に対して、2×2の振動子アレイの提示順によって、アルファベットを提示する手法を提案した。

振動を提示する間隔およびその場所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または振動子の数を増やす必要がある。一方、移動振動を用いた場合、間隔およびその場所の組み合わせに基づく場合よりも、短い時間かつ少ない振動子の数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、強度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。これらの理由から、本研究においては、移動振動を振動通知に用いることを検討する。

## 2.2 振動を用いた情報提示のための調査

振動によって、文字、数字、または障害物の有無のような情報を提示するための調査をしたものがある。Kimら [KSL21] は、提示する振動の周波数および振幅を変更することにより、複数ある振動アレイの提示順を識別する精度を向上させることを試みた。Paritiら [PTO20] は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ため、ユーザの快適性および気づきやすさの観点から適切な振動の提示場所および提示強度を調査した。

これらの研究は、振動の提示順序におけるパターンの識別精度を向上させるため、または振動パターンを提示する際に用いる場所および強度を調査している。本研究においては、移動振動の方向を識別する精度を向上させるための調査を行う。

## 2.3 移動振動の調査

移動振動を提示した場合における識別精度の向上または移動振動の提示可能性を調査した論文がある。Horieら [HKS12] は、皮膚を伸縮させるという触覚刺激を用いた手法による移動振動の提示可能性を調査した。Laraら [RCES<sup>+</sup>09] は、腕において PhS を引き起こす振動について、その強度変化に対する提示方向または振動子間の距離の相関関係を調査した。さらに、強度変化に対する提示時間、提示場所、提示方向、または性別の相関関係を調査した [RCE09]。Jeonggooら [KLK<sup>+</sup>12] は、 piezo素子を取り付けた薄板に対して振動を提示することによって引き起こされる PhS の感知への影響を調査した。Ali および Ivan [IP10, IP11] は、背中に対して点または面の移動振動を提示するために、提示する振動の強度を求めるアルゴリズムを提案した。Scott および David [NE15] は、腰に装着した振動子が提示する移動振動の方向を識別するために適切な間隔を調査した。水上および澤田 [水上 07] は、形状記憶合金糸を用いた振動アクチュエータを用いて、手のひら、人差し指、および手首において PhS を引き起こすことができる振動の強度および周波数を調査した。また、このデバイスに配置された各振動子の強度を時間に対して変化させることによって、手のひら上に物体をなぞったような感覚を提示できることを発見した [水上 08]。Jongman および Seungmoon [JS10, JS13] は、薄板上における 2 箇所に対して振動を提示することにより、振動の強度、提示時間、PhS による振動の強度、および PhS による振動を感知した場所の関係を調査した。Tawaら [TNTY21] は、手のひらに振動を提示する際に、振動を提示する時間における振動の強度の変化方法によって、2 つの振動子の外側に移動振動を提示できることを発見した。上田ら [上田 07] は、PZT 振動子を用いて親指、人差し指、および小指の腹側に振動を提示することにより、手のひら上に角度情報を提示し、その識別精度を調査した。Bellichaら [BTLB19] は手のひらに対して移動振動を提示した場合における、移動振動の終点位置および振動の提示時間の関係性を調査した。Elsayedら [EWM<sup>+</sup>20] は、前腕、背中、または手のひらなどに対して移動振動を提示した場合における方向の識別精度の違いについて調査した。Gunhyuk および Seungmoon [PC18] は、携帯端末の 4 隅または両手の人差し指に対して振動を提示した際の振動の提示位置および振動の道筋の識別精度を調査した。鈴木ら [鈴木 14] は、手首に対して PhS を提示した場合における最適な振動子を装着する位置、振動子間の距離、提示する移動振動の方向、および振動の強度を調査した。Katoら [KHK10] は振動の強度、振動を提示する間隔、および振動の提示方法による PhS の明瞭さを調査した。

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。

## 2.4 振動以外を用いた通知およびその調査

振動以外の触覚を通じた通知手法が研究されている。Dimitriadis および Alexander [DA14] は、ポケット内にて携帯端末を変形させることによって通知する 3 種類のシステムを提案し



た. Dobbstein ら [DSB<sup>+</sup>18] は, 肘から手首の間を行き来する腕輪型のデバイスを用いて, タイマーの残り時間またはメールの件数のような情報を提示するシステムを提案した.

また, 通知の適切な提示手法も調査されている. Roumen ら [RPZ15] は, 指輪型のデバイスにおいて, 光, 音, 振動, 突き, および熱を用いた通知に対するユーザの反応速度を調査している. Bhatia ら [BKA<sup>+</sup>21] は, 鎖骨, 肩, 上腕, 横腹, 腹部, および腰に対して, それぞれ押下, 突き, つまみ, ブラシによるなぞり, 振動, 熱さ, 冷たさ, 風, 湿り気, および吸い付きを用いて通知した場合におけるユーザの反応速度, 反応の精度, および快適さを調査した. 来迎ら [来迎 13] は, 携帯端末および帽子型デバイスを用いて, 音, 振動, またはその両方を提示した場合かつ, 歩行, 騒音, および静寂の場合における, ユーザの気づいたタイミングおよび気づいた提示手法を調査した.

これらの研究は, 振動以外の提示方法を用いて通知する手法または通知する際の適切な提示手法を提案している. 我々は, Roumen らが行った調査 [RPZ15] が振動による反応速度が最も速いという結果を示すため, 振動, 特に移動振動を用いて通知する手法を提案した.

## 第3章 手におけるPhSによる方向刺激

現在、我々は移動振動による通知を用いることを検討している。方向情報を付与するために、振動の錯覚現象である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1.2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。

### 3.1 振動通知の提示場所の候補

提示場所の候補は、爪、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 [AKW07] 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分かっている [水上07] 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 [MFRL10]。なお、後述する4章および6章の実験結果より、デバイスの提示場所として指および手首の組み合わせを使用する。

### 3.2 実装したデバイス

実装したデバイスを図3.1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 [日高21, 日高22b, 日高22a, 日高23] と同じく、リニア振動アクチュエータ (Linear Resonant Actuator. 以降, LRA) を用いる (図3.1A)。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、LRAの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3.1A)。デバイスを装着した様子を図3.1Bに示す。なお、このデバイスにおける振動の制御には Analog Discovery 2 [Ref] を用いる。

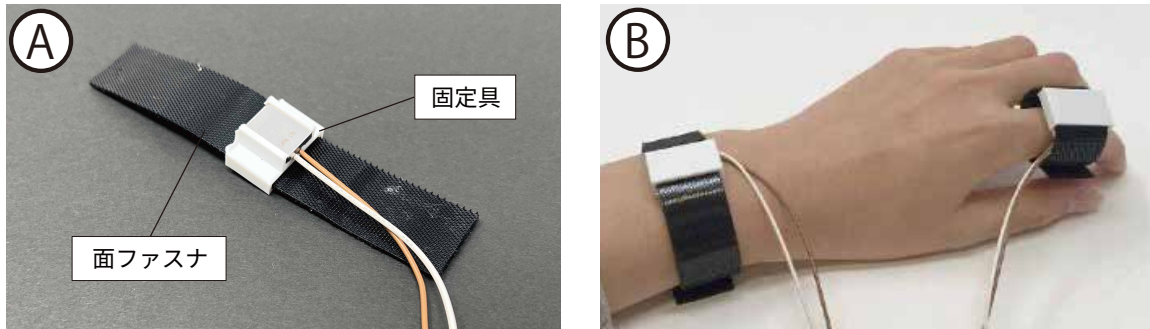


図 3.1: 実装したデバイス. A) 振動を提示するために用いる LRA を取り付けたデバイス. B) デバイスを手首および指に装着した様子.

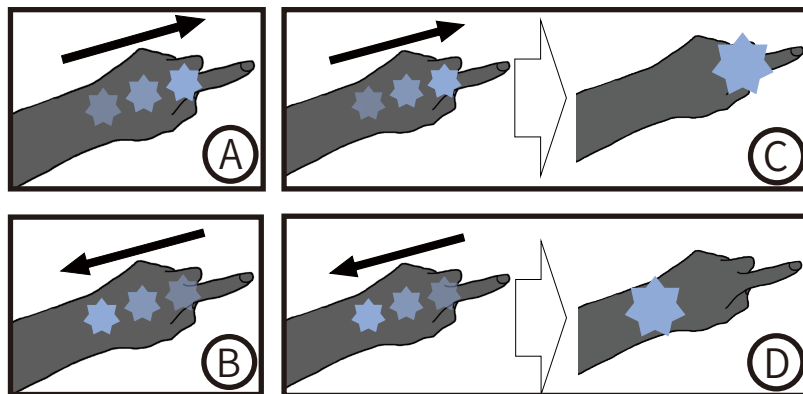


図 3.2: 実装したデバイスを用いて提示される移動振動の例. A および B は方向を提示する. C および D は方向を提示した後, 1 箇所振動を提示する.

### 3.3 デバイスを用いて提示する移動振動

実装したデバイスを用いて、提示する移動振動を以下に示す。

- 手首から指への移動振動（図 3.2A）
- 指から手首への移動振動（図 3.2B）
- 手首から指への移動振動の提示後、指のみの振動（図 3.2C）
- 指から手首への移動振動の提示後、手首のみの振動（図 3.2D）
- 手首から指への移動振動および指から手首への移動振動の繰り返し

作製した移動振動を通知の内容ごとに付与する。

## 第4章 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。本章においては、適切な提示場所の組み合わせを決定するための手法について説明した後、実際に行った実験の詳細および結果を述べる。

### 4.1 適切な提示場所の組み合わせを決定するための手法

本調査においては、適切な提示場所の組み合わせを決定するために、振動子にかかる電圧（以降、提示電圧）における知覚強度が同じとなる範囲を調査する。1.4節において述べたように、各提示場所の組み合わせにおいてそれぞれの振動子にかかる電圧が等しい場合にも、提示場所ごとの知覚強度に差がある可能性が示唆された。これにより、ユーザの手の2箇所に振動を提示した際、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。例えば、提示場所の組み合わせが爪-指の場合、ユーザの爪に装着した振動子に4.0V、指に装着した振動子に1.0Vを流したとする（つまり、爪の提示電圧が4.0V、指の提示電圧が1.0Vである）。この時、ユーザが爪への振動に敏感（提示電圧以上に振動を知覚してしまう）であり、指への振動に鈍感（提示電圧以下に振動を知覚してしまう）であった場合、ユーザは爪および指への振動が同じであると認識する（つまり、爪および指の知覚強度に差がある）可能性がある。そのため、図4.1に示すような、爪への振動の知覚強度が同じであると認識する指への提示電圧の範囲（以降、丁度可知差異 [黒田 13]）を調査する。なお、図4.1の場合、爪へ1.0Vの振動を提示した場合、指への提示電圧が0.5Vから2.5Vの場合、ユーザは爪および指への振動は同じ強度であると認識していることになる。この時、ユーザが爪および指への振動が同じ強度であると判断した指への提示強度の範囲である0.5Vから2.5Vが丁度可知差異である。

この調査を全ての提示場所の組み合わせに対して行った結果、丁度可知差異が殆ど、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。丁度可知差異の重なりとは、ユーザの爪に1.0Vおよび4.0Vを提示した場合、図4.2のような結果が得られたとする。この時、指に2.0Vの振動を提示し、爪に1.0Vの振動を提示した後、4.0Vの振動を提示した場合、ユーザが異なる振動が提示されたと認識できない可能性がある。このため、提示場所の組み合わせとして爪-指は採用しない。

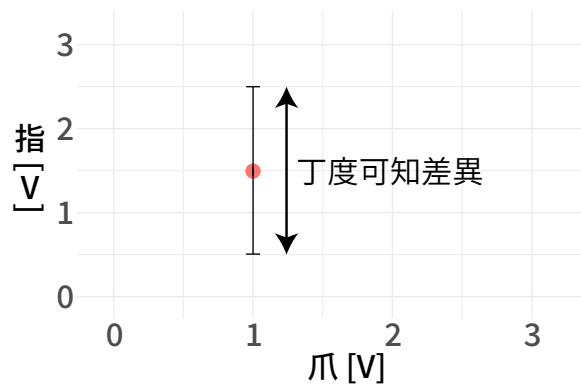


図 4.1: 爪へ 1.0V の振動を提示した場合における，ユーザが爪および指への振動が同じ強度であると判断した指への提示強度の平均値およびその範囲の例．エラーバーが丁度可知差異を示す．

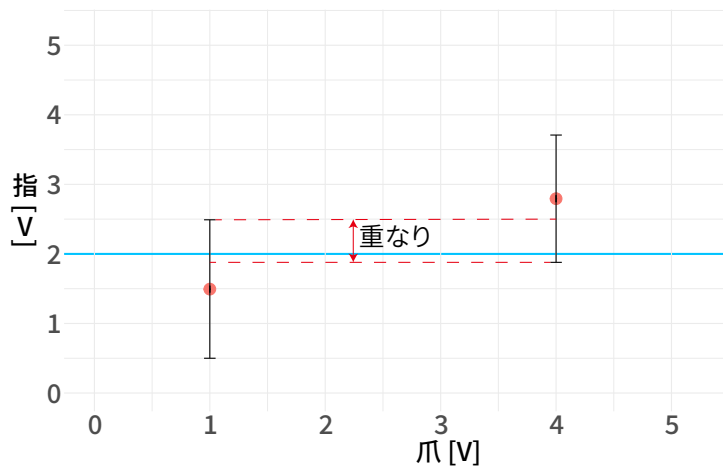


図 4.2: 爪へ 1.0V および 4.0V の振動を提示した場合における，それぞれの平均値および丁度可知差異の例．エラーバーが丁度可知差異を表す．例えば，指に 2.0V の振動を提示した場合，爪に 1.0V の振動または 4.0V の振動を提示した場合どちらも同じ振動であると認識する可能性があることを示す．

## 4.2 実験デバイス

実験において用いたデバイスは、3.2節において述べたものである。参加者は、このデバイスを爪、指、手首の3箇所のうち、2箇所に装着する（図3.1B）。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振動の強度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。

## 4.3 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。

## 4.4 タスク

タスクは心理物理学実験における調整法[黒田13]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、図4.3に示す実験アプリケーションにおけるスライダもしくは「+」、「-」ボタンを押すことによって、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、調整段階における強度の確認のために、参加者は、図4.3の中央にある「振動を提示する」ボタンを押すことによって、基準振動および比較振動（比較振動の提示電圧は自ら調整した強度である）を何度でも提示させることができる。この振動の提示は、最初に提示された2つの振動と同様の順序である。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。

## 4.5 実験の条件および実験全体の流れ

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）



図 4.3: 実験において用いたアプリケーションの画面. 参加者は, 中央のスライダーおよび「+」, 「-」ボタンを用いて, 基準振動の提示電圧を調整できる. また, 中央の「振動を提示する」ボタンを押すことによって, 基準振動および比較振動を提示されることことができる.



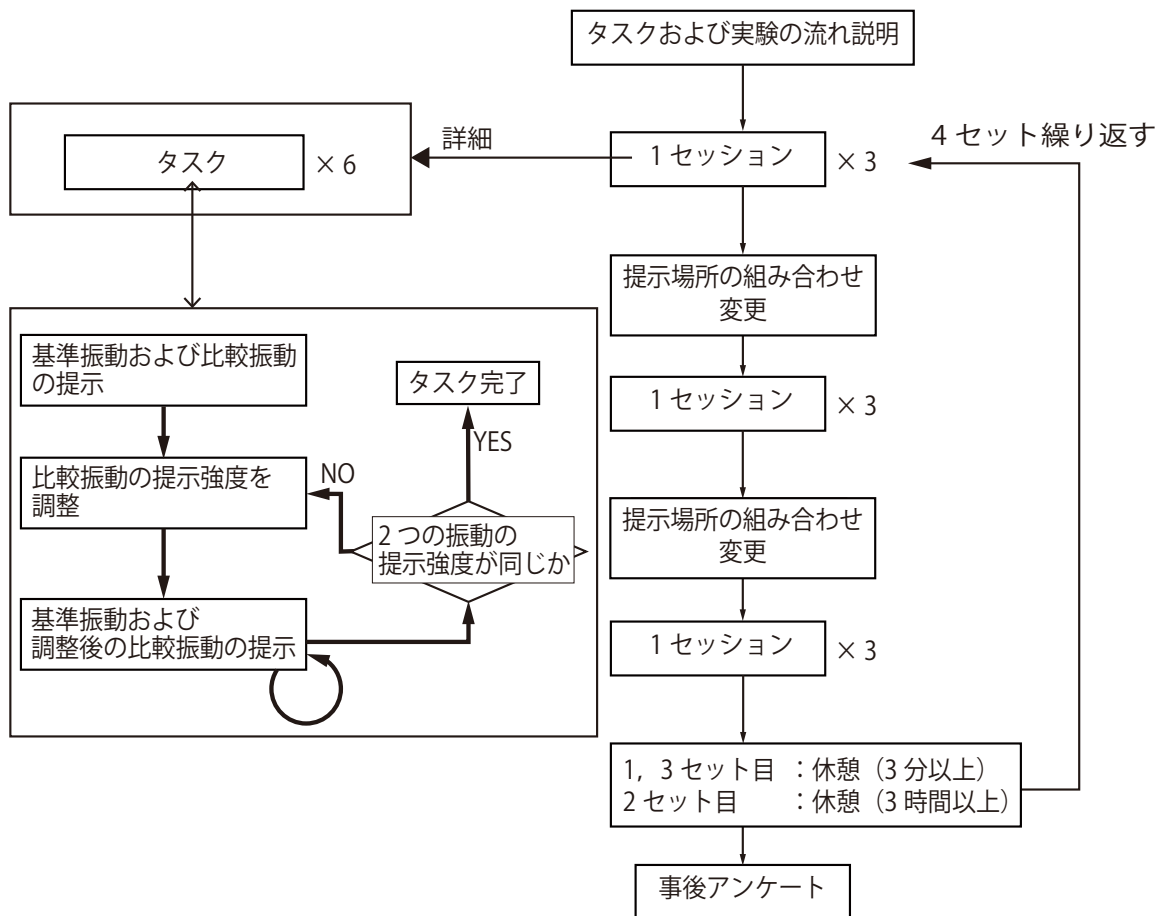


図 4.4: 実験 1 の流れ.

- 基準振動の提示電圧（2通り）：  
4.0V, 1.0V
- 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2.0Vの場合は、2.0V）、5.0V

なお、基準振動の提示電圧を1Vおよび4Vにしたのは、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である。

実験の流れを図4.4に示す。図4.4に示す通り、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（6タスク×9セッション×4セット＝216回）行う。

まず、参加者は、タスク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外して、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。これは、2セット分の実験の所要時間が1時間30分程度であるため、疲労を十分に回復してもらうことが目的である。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）を組み合わせた計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。

## 4.6 結果

図4.5、図4.6、および図4.7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ある。丁度可知差異は、標準偏差に対し、確率0.75のZ得点である0.6745をかけることによって得られる。また、丁度可知差異の重なりが0.1V未満の場合を、殆ど重ならないとした。各提示場所の組み合わせごとにおける重なりを表4.1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、0.064V）指-手首条件を提示場所として採用した。

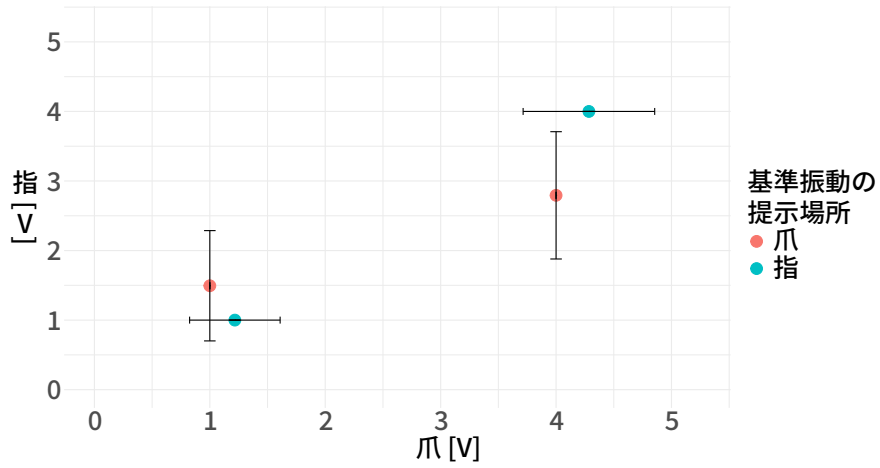


図 4.5: 提示場所の組み合わせが爪-指の場合における調整結果. エラーバーは丁度可知差異を表している.

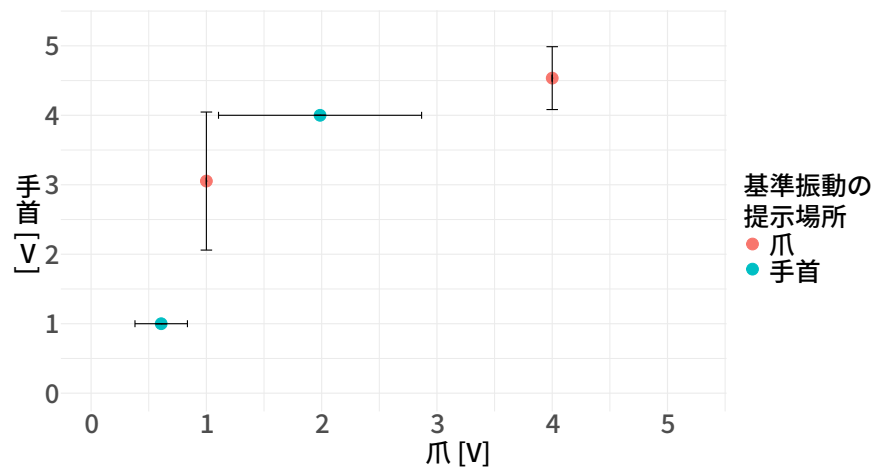


図 4.6: 提示場所の組み合わせが爪-手首の場合における調整結果. エラーバーは丁度可知差異を表している.

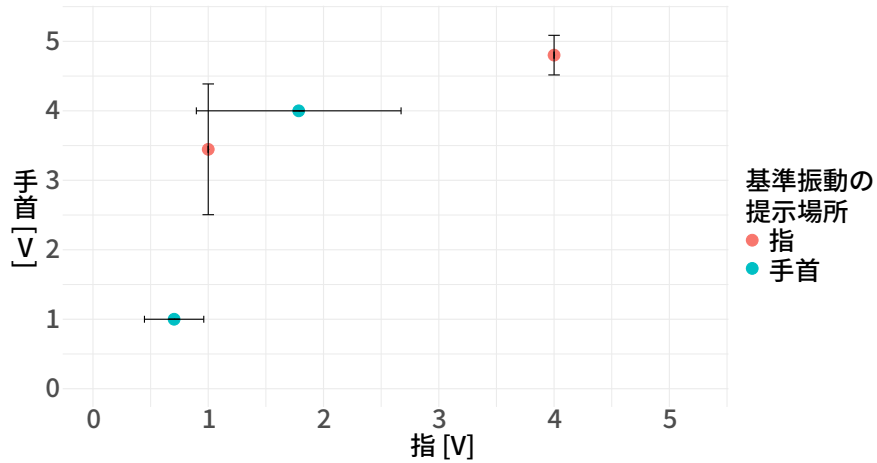


図 4.7: 提示場所の組み合わせが指-手首の場合における調整結果. エラーバーは丁度可知差異を表している.

表 4.1: 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 4.5)	爪 指	0.41 V 重なりなし
爪-手首 (図 4.6)	爪 手首	重なりなし 重なりなし
指-手首 (図 4.7)	指 手首	重なりなし 0.064 V

## 第5章 学会におけるデモ発表およびその感想

第4章において実装した通知システムを用いて、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）においてデモ発表を行った [日高 22a]。本章においては、実装したシステムの概要、デモの発表内容、およびデモ参加者の感想を述べる。

### 5.1 実装したシステムの概要

作製したデバイスを図 5.1 に示す。これは、図 1.4 に示すように将来的なシステムに近い体験をしてもらうために、第3章にて実装したデバイスに加えて、スマートウォッチ（Apple Watch Series 6, 44 mm）を用いたものである。このスマートウォッチを用いて、振動通知を提示すると同時にスマートウォッチにその振動通知の内容を表示する。なお、スマートウォッチおよび手首に取り付けた振動子は、統合することを考える。また、振動通知のパラメータは、提示時間が 0.5 秒、提示場所が指-手首、2つの振動を提示する際の時間差（以降、遅延時間）が 0.25 秒、振動子にかかる電圧の変化条件（以降、電圧変化）が線形であった。これは、研究室の学生を対象とした予備実験を行った結果、この値が最も PhS を感知しやすいと回答したためである。

### 5.2 デモの発表内容

3.3 節に示す振動通知を提示するデモを行った。なお、5.1 節において述べた通り、振動通知を提示すると同時にスマートウォッチにその振動通知の内容が表示される。実際に提示した振動通知およびその通知の内容を図 5.2 に示す。また、振動通知の提示およびスマートウォッチの画面表示の制御にはスマートフォン用アプリケーションを用いた。

### 5.3 デモ参加者の感想

表 5.1 は、デモの参加者から頂いた感想の一覧である。デモにおいて移動振動を提示した際、PhS を感知したと回答した参加者および PhS を感知しなかったと回答した参加者の 2 群に分けられた。このことから、個人差があることが分かった。一方、移動振動の方向はほとんどの参加者が分かるかと回答した。PhS を感知したと回答した参加者にどのように感知するかを聞いたところ、「振動子間をなぞられるような感じがあった」「振動子と振動子の間を振動



図 5.1: デモにおいて用いたシステム. 3.2 節において示したデバイスに加えて, スマートウォッチを用いた. スマートウォッチおよび手首に取り付けた振動子は, 将来的には統合することを考える.

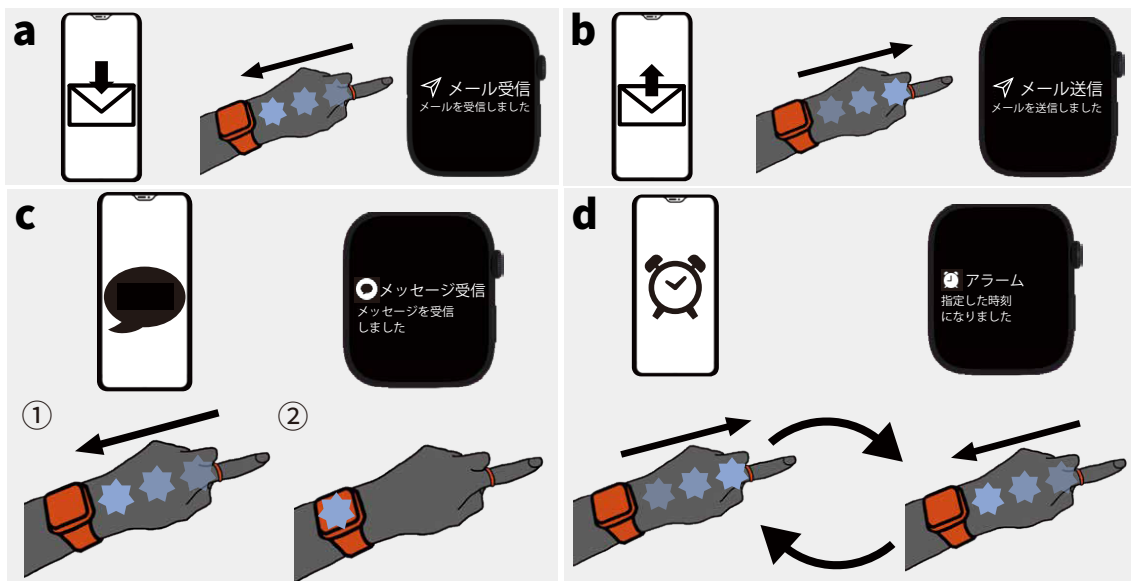


図 5.2: デモにおいて実際に提示した振動通知およびその通知の内容の例. a) メールの受信通知. 指から手首への移動振動が提示される. b) メールの送信通知. 手首から指への移動振動が提示される. c) メッセージの受信通知. 指から手首への移動振動の提示後, 手首のみの振動が提示される. d) アラーム. 手首から指への移動振動および指から手首への移動振動の繰り返しが提示される.

表 5.1: デモ参加者から頂いた感想の一覧.

デモの参加者から頂いた感想
移動振動をゲームエフェクトとして活用すると面白そう
方向から通知の内容が連想されると分かりやすい
振動子の個数を増やすことによって、表現できる通知が増えるとより使い勝手がよくなりそう
前腕-手首の組み合わせも場所の候補としてありそう
アラーム（連続での通知）だと方向が分かりやすい
振動した後にもう一度振動を提示すると方向の識別が分かりにくい
振動のリズムとか長さに加えて、方向を追加して、たくさんの種類が増やせてよさそう
点が移動するような振動というより、1つ目の振動子から2つ目の振動子へと、ふわっとワープするように感じた
ゲームコントローラーと組み合わせることによって、ゲームエフェクトを提示する範囲を広げることにも使えそうだった
音がしない状態で通知の種類が分かるのは便利
くるくると回るような移動振動が2次元的に表現出来たら、面白そう

が移動しているなど感じた」といった感想も頂いた。また、デモ参加者から「何度も移動振動を提示することによって、次第に PhS を感知してきた」という感想を頂くことが複数あった。このことから、移動振動を提示する回数によって、PhS の感知しやすさが変わる可能性が示唆された。

## 第6章 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，振動を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 [HSS21] と同じ実験手順およびタスクであり，実験において用いた条件および参加者が異なる。

### 6.1 参加者

参加者は研究室外の学生または社会人8名（男性7名，平均年齢20.6歳，右利き7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年半，1名は1年，1名は2ヶ月，残りの参加者は使用したことがないと回答した。

### 6.2 タスク

参加者には，体上の2箇所において振動が提示された。その後，図6.1に示す実験アプリケーションを用いて，振動した場所が体の外側から内側の方向（図6.1における方向1）または，体の内側から外側の方向（図6.1における方向2）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。

電圧変化は線形および対数の2通りである（表6.1）。さらに，1.2節において述べた通り，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 [All70]。このため，遅延時間を同時（0.0倍），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



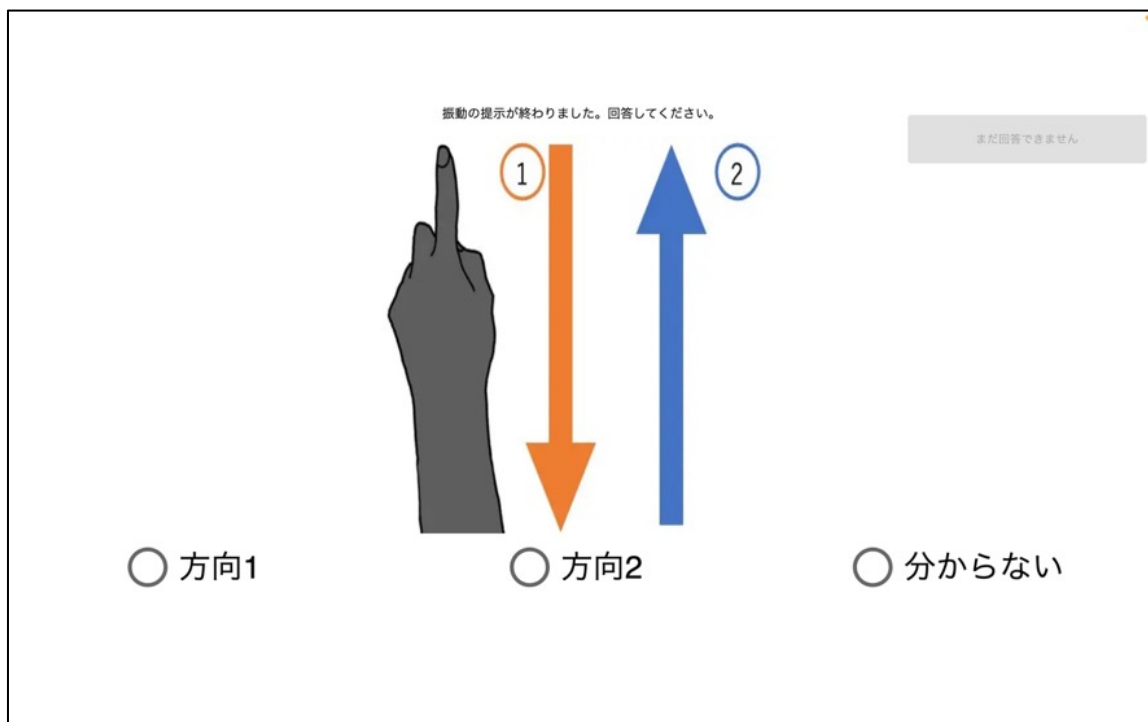


図 6.1: 実験 2 において用いたアプリケーションの画面。参加者は、画面中央にある手の画像および矢印を見ながら、ラジオボタンを用いて「方向 1」、「方向 2」、および「分からない」の選択肢を選択する。その後、右上にある回答ボタンを用いて、回答を送信する。

表 6.1: 振動子にかかる電圧の変化方法およびその具体的な数値.

振動子にかかる電圧の変化方法	振動子にかかる電圧 [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

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。

### 6.3 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 章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。

### 6.4 結果および考察

図 6.2 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、方向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。

表 6.2: 参加者に提示した方向条件（ダミー条件である移動しない条件を含む）および参加者の回答の混同行列. なお，方向 1，方向 2 とは，図 6.1 に示す矢印の方向を指す.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	91.32%	5.90%	2.78%
方向 2	5.56%	92.88%	1.56%
移動しない	25.52%	35.24%	39.24%

表 6.3: 遅延時間がない場合，つまり遅延時間が 0.0 倍の場合の移動振動を提示した際における，参加者に提示した方向条件（ダミー条件である移動しない条件を含む）および参加者の回答の混同行列. なお，方向 1，方向 2 とは，図 6.1 に示す矢印の方向を指す.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	75.50%	16.10%	8.30%
方向 2	13.50%	81.80%	4.70%
移動しない	25.50%	35.20%	39.20%

表 6.4: 遅延時間がある場合，つまり遅延時間が 0.5 倍および 1.0 倍の場合の移動振動を提示した際における，参加者に提示した方向条件および参加者の回答の混同行列. なお，方向 1，方向 2 とは，図 6.1 に示す矢印の方向を指し，移動しない振動は提示していない.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	99.20%	0.80%	0.00%
方向 2	1.60%	98.40%	0.00%

表 6.5: アンケートとして，参加者が PhS を感じた提示場所および提示時間の組み合わせの順位. 縦軸が組み合わせ，横軸がアンケート項目を示す.

	1 番目に感じた	2 番目に感じた	3 番目に感じた	4 番目に感じた
爪-手首, 0.5 秒	3 人	1 人	3 人	1 人
爪-手首, 1.0 秒	1 人	5 人	1 人	1 人
指-手首, 0.5 秒	2 人	0 人	2 人	4 人
指-手首, 1.0 秒	2 人	2 人	2 人	2 人

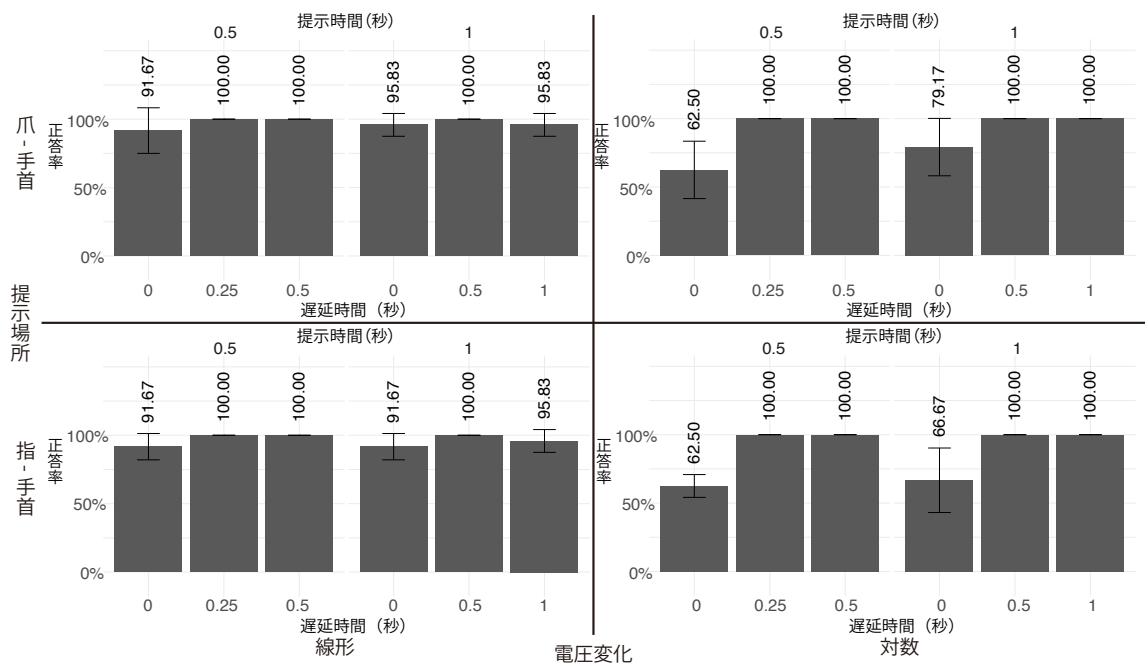


図 6.2: 参加者が正しく振動の方向を識別できた回数。エラーバーは標準偏差を表している。提示場所、電圧変化、遅延時間、および提示時間の組み合わせごとに 6 回の試行が行われている。また、変化しないダミーの条件は分析から除く。

また、正答率に対して有意差の検定を行った。Shapiro-Wilk の検定を行ったところ、正規性はなかった ( $p < 0.05$ ) ため、ノンパラメトリックな検定を行った。遅延時間に対する検定のみ、3 群以上の多重比較として利用される、Steel-Dwass 検定を行った。提示時間、提示場所、および電圧変化に対する検定は、2 群の比較として利用される、ウィルコクソンの符号付順位和検定を行った。なお、 $p$  値が 0.05 未満の場合を統計的に有意であるとした。遅延時間について、0.0 倍および 0.5 倍、0.0 倍および 1.0 倍は有意差が確認された (いずれも  $p < 0.05$ )。一方、0.5 倍および 1.0 倍は有意差が確認されなかった ( $p = 1.00$ )。提示時間、提示場所、および電圧変化については、いずれも有意差が確認された (提示時間:  $p < 0.05$ , 提示場所:  $p < 0.05$ , 電圧変化:  $p < 0.05$ )。

図 6.2 より、正答率が最もよい条件は、以下の 14 条件であり、いずれも 100%であった。

- 提示場所が爪-手首、電圧変化が線形、遅延時間が 0.5 倍、および提示時間が 0.5 秒
- 提示場所が爪-手首、電圧変化が線形、遅延時間が 1.0 倍、および提示時間が 0.5 秒
- 提示場所が爪-手首、電圧変化が線形、遅延時間が 0.5 倍、および提示時間が 1.0 秒
- 提示場所が爪-手首、電圧変化が対数、遅延時間が 0.5 倍、および提示時間が 0.5 秒
- 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

- 提示場所が爪-手首, 電圧変化が対数, 遅延時間が 0.5 倍, および提示時間が 1.0 秒
- 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 1.0 秒
- 提示場所が指-手首, 電圧変化が線形, 遅延時間が 0.5 倍, および提示時間が 0.5 秒
- 提示場所が指-手首, 電圧変化が線形, 遅延時間が 1.0 倍, および提示時間が 0.5 秒
- 提示場所が指-手首, 電圧変化が線形, 遅延時間が 0.5 倍, および提示時間が 1.0 秒
- 提示場所が指-手首, 電圧変化が対数, 遅延時間が 0.5 倍, および提示時間が 0.5 秒
- 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 0.5 秒
- 提示場所が指-手首, 電圧変化が対数, 遅延時間が 0.5 倍, および提示時間が 1.0 秒
- 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

遅延時間が 0.5 倍もしくは 1.0 倍の場合は, ほとんどの条件において正答率は 100%であった。また, 遅延時間が 0.0 倍かつ線形の場合は, 正答率は 90%以上であった。一方, 遅延時間が 0.0 倍かつ対数の場合は, いずれも正答率は 80%未満であり, 標準偏差も大きい。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える。

表 6.2 に参加者に提示した方向条件 (ダミー条件である移動しない条件を含む) および参加者の回答の混同行列を示す。なお, 方向 1 および方向 2 とは, 図 6.1 に示す矢印の方向である。この結果から, 移動振動を提示した場合, 振動の識別は十分にできると考える。さらに, 表 6.3 および表 6.4 にそれぞれ遅延時間がない場合, つまり, 遅延時間が 0.0 倍の場合および遅延時間がある場合, つまり遅延時間が 0.5 倍および 1.0 倍の場合の混同行列を示す。なお, 表 6.4 に示す遅延時間がある場合の混同行列においては, 移動しない振動を提示しなかった。表 6.3 より, 遅延時間がない場合, ユーザは分からないと回答することより, 逆の方向を回答する可能性が高いことが分かる。このことから, 遅延時間が 0 倍の条件における移動振動を通知に用いない方がよいことが分かる。一方, 表 6.4 より, 遅延時間がある場合, ユーザは分からないと回答することはなく, 逆方向を回答する可能性も小さいことが分かる。このことから, 遅延時間が 0.5 倍もしくは 1.0 倍の条件における移動振動を通知に用いることができる可能性が高いことが分かる。

表 6.5 にアンケートとして, 参加者が PhS を感じた提示場所および提示時間の組み合わせの順位の結果を示す。なお, 提示場所および提示時間の組み合わせの順位を回答してもらった理由は, セッションごとの条件として, これらの条件を用いたためである。この結果より, 1 番目に PhS を感じた人はどの条件にもまんべんなくいることが分かる。特に, 提示場所が爪-手首, および提示時間が 1.0 秒の場合は, 2 番目に PhS を感じた人が 5 人と全体的に多いことから, PhS を感じやすい傾向があると言える。一方, 提示場所が指-手首, および提示時

間が0.5秒の場合は、4番目にPhSを感じた人が4人と全体的に多いことから、PhSを感じにくい傾向があると言える。

今回の実験結果より、我々は遅延時間があり、かつ電圧変化が対数である振動を提示することが適切であるとした。一方、正答率およびアンケートの結果からは、提示場所および提示時間の適切な条件が分からなかった。このため、ユーザにこれらの条件を決定してもらい、または新たな実験項目を追加して、さらに実験を行う必要があると考える。

## 第7章 議論および今後の課題

本章においては、実験結果より考えられる議論および今後の課題を述べる。

### 7.1 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章に示すように、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、ユーザが提示された振動通知の種類を正確に識別するためである。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った後、ユーザにはアンケートに回答してもらう。この結果からデバイスの最適な装着場所を決定することを考える。

### 7.2 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。

### 7.3 振動子を増やすことによる移動振動の増加

本研究においては、2つの振動子による移動振動を振動通知に用いた。この場合、2方向（6章における方向1、方向2）しか表現できない。そこで、振動子を3つ以上付けることにより、2次元の情報を提示することができる [IKSP12,LCL<sup>+</sup>16] と考えた。例えば、手首および人差し指の付け根に追加して、非利き手の薬指の根本に振動子を提示することにより、更に4方向（手首から薬指方向、薬指から人差し指方向、およびそれらの逆方向）の提示が可能である。これにより、より幅広い通知の表現が可能になると考える。

## 7.4 年齢による PhS の感知しやすさ

一般に高齢者は加齢に伴って視覚・聴覚・嗅覚・味覚・触覚の五感に加えて平衡感覚、運動能力や免疫能など幅広く身体機能の低下が生じるといわれている [北川 04]。このため、年齢によって振動が完治しにくくなり、結果的に PhS の感知しにくくなる可能性がある。一方、第 5 章において示したデモ発表において、参加者として、学生から社会人まで様々な年齢の方に参加してもらった。この時、年齢によって、PhS の感知しやすさに偏りがあるようには見られなかった。このため、年齢による影響がないとも考えられる。そこで、年齢による PhS の感知しやすさを比較するために、様々な年齢の実験参加者を募り、実験を行う必要がある。



## 第8章 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、振動を提示するための適切な場所を調査した。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た。調査の結果、移動振動の方向の識別精度が高くなる条件として、遅延時間が 0.5 倍（提示時間が 0.5 秒の場合、0.25 秒、提示時間が 1.0 秒の場合、0.5 秒）、または 1.0 倍（提示時間が 0.5 秒の場合、0.5 秒、提示時間が 1.0 秒の場合、1.0 秒）であり、電圧変化が対数である場合であった。なお、最も高い方向の識別精度は、先行研究の結果よりも 34.72% 向上した 100.0% であった。今後、この結果をもとに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。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，高橋伸先生，川口一画先生には多大なご意見とご指導を頂きました。心から感謝いたします。特に，主指導教員である志築文太郎先生には，研究の進め方，論文執筆，発表の方法といった研究に関することのみならず，日常生活における研究者の心構えなど多岐に渡るご指導を頂きました。先生の熱心なご指導のおかげで，これまでの研究成果の発表および本論文の執筆ができました。ここに深く感謝の意を表します。

インタラクティブプログラミング研究室の後輩，同輩，先輩方には研究生生活においてお世話になりました。特に WAVE チームの皆様には，チームゼミにおけるご意見や論文の添削といった研究に関する多くのご支援に加えて，研究室においても研究の進め方や研究生生活について多くのご助言を頂きました。研究室の皆様のおかげで，3年間充実した研究生生活を送ることができました。深く感謝いたします。

さらに研究室の同輩の皆様とは，時に研究やプログラミングのことについて互いに相談したり教え合ったりして助け合い，時にご飯を食べたり遊びに行ったりして仲を深め合いました。皆様のおかげで私は，研究室における時間を有意義かつ楽しく過ごすことができました。心より感謝いたします。

最後に，学生生活においてお世話になった皆様，そして，私の学生生活を支えて頂いた家族に深く感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [AKW07] Hideyuki Ando, Eisuke Kusachi, and Junji Watanabe. Nail-Mounted Tactile Display for Boundary/Texture Augmentation. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, ACE '07*, pp. 292–293, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery.
- [All70] David S. Alles. Information Transmission by Phantom Sensations. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 85–91, 1970.
- [AZP<sup>+</sup>15] Jessalyn Alvina, Shengdong Zhao, Simon T. Perrault, Maryam Azh, Thijs Roumen, and Morten Fjeld. OmniVib: Towards Cross-Body Spatiotemporal Vibrotactile Notifications for Mobile Phones. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, pp. 2487–2496, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [BKA<sup>+</sup>21] Arpit Bhatia, Dhruv Kundu, Suyash Agarwal, Varnika Kairon, and Aman Parnami. Soma-Noti: Delivering Notifications Through Under-Clothing Wearables. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '21*, pp. 1–8, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [BMYW22] Corentin Bernard, Jocelyn Monnoyer, Sølvi Ystad, and Michael Wiertlewski. Eyes-Off Your Fingers: Gradual Surface Haptic Feedback Improves Eyes-Free Touchscreen Interaction. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '22*, pp. 1–10, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [BTLB19] Angelina Bellicha, Andres Trujillo-Leon, and Wael Bachta. Phantom Sensation: When the Phantom Escapes the Bounds of the Actuators and the End-Point Is Sensed in the Air. In *2019 IEEE World Haptics Conference, WHC '19*, pp. 91–96. IEEE, 2019.
- [CCL<sup>+</sup>21] Shao-Yu Chu, Yun-Ting Cheng, Shih Chin Lin, Yung-Wen Huang, Yi Chen, and Mike Y. Chen. MotionRing: Creating Illusory Tactile Motion around the Head Using 360° Vibrotactile Headbands. In *Proceedings of The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '21*, pp. 724–731, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.

- [DA14] Panteleimon Dimitriadis and Jason Alexander. Evaluating the Effectiveness of Physical Shape-Change for in-Pocket Mobile Device Notifications. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 2589–2592, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [DSB<sup>+</sup>18] David Dobbstein, Evgeny Stemasov, Daniel Besserer, Irina Stenske, and Enrico Rukzio. Movelet: A Self-Actuated Movable Bracelet for Positional Haptic Feedback on the User's Forearm. In *Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '18, pp. 33–39, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [EWM<sup>+</sup>20] Hesham Elsayed, Martin Weigel, Florian Müller, Martin Schmitz, Karola Marky, Sebastian Günther, Jan Riemann, and Max Mühlhäuser. 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, 2020.
- [GPRB16] Aakar Gupta, Thomas Pietrzak, Nicolas Roussel, and Ravin Balakrishnan. Direct Manipulation in Tactile Displays. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 3683–3693, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [HKSI21] Arata Horie, Zendai Kashino, Hideki Shimobayashi, and Masahiko Inami. Two-Dimensional Moving Phantom Sensation Created by Rotational Skin Stretch Distribution. In *Proceedings of 2021 IEEE World Haptics Conference*, WHC '21, pp. 139–144. IEEE, 2021.
- [HLC16] Meng-Ju Hsieh, Rong-Hao Liang, and Bing-Yu Chen. NailTactors: Eyes-Free Spatial Output Using a Nail-Mounted Tactor Array. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '16, pp. 29–34, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [HSS21] Takuma Hidaka, Yusuke Sei, and Buntarou Shizuki. Pilot Study on Notification Using Phantom Sensation on Hand. In *Proceedings of Asian CHI Symposium 2021*, Asian CHI Symposium 2021, pp. 157–159, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [IKSP12] Ali Israr, Seung-Chan Kim, Jan Stec, and Ivan Poupyrev. Surround Haptics: Tactile Feedback for Immersive Gaming Experiences. In *Proceedings of Extended Abstracts of the 2012 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '12, pp. 1087–1090, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.

- [IP10] Ali Israr and Ivan Poupyrev. Exploring Surround Haptics Displays. In *Proceedings of Extended Abstracts of the 2010 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '10, pp. 4171–4176, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [IP11] Ali Israr and Ivan Poupyrev. Tactile Brush: Drawing on Skin With a Tactile Grid Display. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 2019–2028, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [JS10] Jongman Seo and Seungmoon Choi. Initial Study for Creating Linearly Moving Vibrotactile Sensation on Mobile Device. In *Proceedings of 2010 IEEE Haptics Symposium*, pp. 67–70. IEEE, 2010.
- [JS13] 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, 2013.
- [KHK10] Hiroshi Kato, Yuki Hashimoto, and Hiroyuki Kajimoto. Basic Properties of Phantom Sensation for Practical Haptic Applications. In *Proceedings, Part I, of the International Conference on Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations*, pp. 271–278, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer.
- [KLK<sup>+</sup>12] Jeonggoo Kang, Jongsuh Lee, Heewon Kim, Kwangsu Cho, Semyung Wang, and Jeha Ryu. Smooth Vibrotactile Flow Generation Using Two Piezoelectric Actuators. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 5, No. 1, pp. 21–32, 2012.
- [KSL21] Taejun Kim, Youngbo Aram Shim, and Geehyuk Lee. Heterogeneous Stroke: Using Unique Vibration Cues to Improve the Wrist-Worn Spatiotemporal Tactile Display. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, pp. 1–12, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [LCCC17] Yi-Chi Liao, Yen-Chiu Chen, Liwei Chan, and Bing-Yu Chen. Dwell+: Multi-Level Mode Selection Using Vibrotactile Cues. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 5–16, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [LCL<sup>+</sup>16] Yi-Chi Liao, Yi-Ling Chen, Jo-Yu Lo, Rong-Hao Liang, Liwei Chan, and Bing-Yu Chen. EdgeVib: Effective Alphanumeric Character Output Using a Wrist-Worn Tactile Display. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 595–601, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.

- [MFRL10] Michael Matscheko, Alois Ferscha, Andreas Riener, and Manuel Lehner. Tactor Placement in Wrist Worn Wearables. In *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers 2010, ISWC '10*, pp. 1–8. IEEE Computer Society, 2010.
- [MLYZ19] Zhuoluo Ma, Yue Liu, Dejiang Ye, and Lu Zhao. Vibrotactile Wristband for Warning and Guiding in Automated Vehicles. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '19*, pp. 1–6, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [MMUW15] Anita Meier, Denys J. C. Matthies, Bodo Urban, and Reto Wettach. Exploring Vibrotactile Feedback on the Body and Foot for the Purpose of Pedestrian Navigation. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Sensor-Based Activity Recognition and Interaction, iWOAR '15*, pp. 1–11, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [NE15] Scott D. Novich and David M. Eagleman. 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, 2015.
- [PC18] Gunhyuk Park and Seungmoon Choi. Tactile Information Transmission by 2D Stationary Phantom Sensations. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, pp. 1–12, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [PTO20] Jagannadh Pariti, Vinita Tibdewal, and Tae Oh. Intelligent Mobility Cane - Lessons Learned from Evaluation of Obstacle Notification System Using a Haptic Approach. In *Proceedings of Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '20*, pp. 1–8, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [QL22] Filipe Quintal and Marco Lima. HapWheel: In-Car Infotainment System Feedback Using Haptic and Hovering Techniques. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 15, No. 1, pp. 121–130, 2022.
- [RCE09] Lara Rahal, Jongeun Cha, and Abdulmotaleb El Saddik. Continuous Tactile Perception for Vibrotactile Displays. In *2009 IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments, ROSE '09*, pp. 86–91. IEEE, 2009.
- [RCES+09] Lara Rahal, Jongeun Cha, Abdulmotaleb El Saddik, Julius Kammerl, and Eckehard Steinbach. Investigating the Influence of Temporal Intensity Changes on Apparent Movement Phenomenon. In *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurements Systems, VECIMS '09*, pp. 310–313. IEEE, 2009.

- [Ref] Diligent Reference. Analog Discovery 2. <https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery-2/start>. (最終閲覧日 2023 年 2 月 13 日) .
- [RPZ15] Thijs Roumen, Simon T. Perrault, and Shengdong Zhao. NotiRing: A Comparative Study of Notification Channels for Wearable Interactive Rings. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, pp. 2497–2500, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [SPHZ13] Bahador Saket, Chrisnawan Prasajo, Yongfeng Huang, and Shengdong Zhao. Designing an Effective Vibration-Based Notification Interface for Mobile Phones. In *Proceedings of the 2013 Conference on Computer Supported Cooperative Work, CSCW '13*, pp. 1499–1504, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [TMMK13] Diane Tam, Karon E. MacLean, Joanna McGrenere, and Katherine J. Kuchenbecker. The Design and Field Observation of a Haptic Notification System for Timing Awareness During Oral Presentations. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13*, pp. 1689–1698, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [TNTY21] Syunsuke Tawa, Hikaru Nagano, Yuichi Tazaki, and Yasuyoshi Yokokohji. Extended Phantom Sensation: Vibrotactile-Based Movement Sensation in the Area Outside the Inter-Stimulus. *Advanced Robotics*, Vol. 35, No. 5, pp. 268–280, 2021.
- [YT09] Koji Yatani and Khai Nhut Truong. SemFeel: A User Interface With Semantic Tactile Feedback for Mobile Touch-Screen Devices. In *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '09*, pp. 111–120, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [黒田 13] 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.
- [上田 07] 上田真太郎, 内田雅文, 野澤昭雄, 井出英人. Phantom sensation と仮現運動を併用した触覚ディスプレイ. 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌), Vol. 127, No. 6, pp. 277–284, 2007.
- [水上 07] 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ティブ論文誌, Vol. 2007, No. 4, pp. 121–128, 2007.
- [水上 08] 水上陽介, 澤田秀之. 形状記憶合金糸を用いた触覚ディスプレイと微小振動の発生確率密度制御による触覚感覚の呈示. 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 12, pp. 3890–3898, 2008.

- [日高 21] 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. 3 pages.
- [日高 22a] 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. 3 pages.
- [日高 22b] 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.
- [日高 23] 日高拓真, 志築文太郎. 手における移動振動の識別精度の調査. 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. 2023-HCI-201, No. 22, pp. 1–8, 2023.
- [白井 97] 白井暁彦, 久米祐一郎, 津田元久, 畑田豊彦. 皮膚感覚のファントムセンセーションを用いた 3 次元画像との対話システム. 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 21.6, pp. 77–84, 1997.
- [北川 04] 北川公路. 老年期の感覚機能の低下—日常生活への影響. 駒澤大学心理学論集 (KARP), Vol. 6, pp. 53–59, 2004.
- [柁徳 18] 柁徳林, 彰真鈴木, 嘉利村田, 永欣佐藤. 臀部触覚を用いた自動車周囲通知システムにおける種別通知. 第 80 回全国大会講演論文集, 第 2018 巻, pp. 395–396, 2018.
- [鈴木 14] 鈴木啓太, トーマセントリグエ, 新妻実保子. 1p2-x07 振動触覚刺激を用いた前腕部へのファントムセンセーションの実現 (触覚と力覚 (2)). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2014, pp. \_1P2–X07\_1–\_1P2–X07\_4, 2014.
- [來迎 13] 來迎直裕, 小笠原直人, 佐藤究, 布川博士. 携帯通知情報提示のための帽子インジケータの評価. 第 75 回全国大会講演論文集, 第 2013 巻, pp. 15–16, 2013.



# 著者論文リスト

## 本論文に関する論文および発表

- 査読あり国際会議論文
  1. Takuma Hidaka, Yusuke Sei, Buntarou Shizuki. Pilot Study on Notification Using Phantom Sensation on Hand. CHI 2021 symposia on Asian CHI Symposium: HCI Research from Asia and on Asian Contexts and Cultures, Association for Computing Machinery, May 2021, pp. 157-159.
- 査読なし国内会議論文
  2. 日高 拓真, 清 佑輔, 志築 文太郎. 手・指におけるファントムセンセーションを用いた通知のための事前実験設計. 第 25 回一般社団法人情報処理学会シンポジウムインタラクシオン 2021, 情報処理学会, 2021 年 3 月, pp. 607-610.
  3. 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 年 12 月, 3 pages.
  4. 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. 情報処理学会研究報告 (HCI-199), 情報処理学会, 2022 年 8 月, 6 pages.
  5. 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 年 12 月, 3 pages.
  6. 日高 拓真, 志築 文太郎. 手における移動振動の識別精度の調査. 情報処理学会研究報告 (HCI-201), 情報処理学会, 2023 年 1 月, 8 pages.

## その他論文

- 査読なし国内会議論文
  6. 三縄 香織, 漆山 裕太, 日高 拓真, 志築 文太郎. ディスプレイ上に表示されるボタンに対する非接触滞留ジェスチャによる選択性能の調査. 情報処理学会 第 83 回全国大会, 情報処理学会, 2021 年 3 月, pp. 4:287-4:288.

7. 西川 宜利, 日高 拓真, 志築 文太郎. ハンドジェスチャ学習のための電氣的筋肉刺激を与えるグローブ型デバイスの試作. 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年12月, 3 pages.
8. 加藤 進吾, 横山 海青, 日高拓真, 佐藤 大樹, 山中 祥太, 志築 文太郎. 2次元ポインティングタスクにおける再テスト信頼性の予備調査. 情報処理学会研究報告 (HCI-199), 情報処理学会, 2022年8月, 6 pages.

## 付録A 実験の際に用いた各種書類

本研究における実験にて用いた、実験同意書、実験計画書を以下に示す。さらに、各実験に用いた実験後アンケートの用紙も合わせて示す。

## A.1 実験計画書

### 実施計画書

#### 1. 課題名：振動による方向提示のための提示強度の調査

#### 2. 概要

##### 2-1. 背景

スマートフォンおよびスマートウォッチ等の携帯端末において振動を用いた通知（以降、振動通知）は、通話の着信、メールの受信、およびカレンダーに登録されている用事を知らせる際に用いられる。一方、ユーザーが判別可能な振動の種類は少ない。種類を増やせば、振動通知のみによりどのようなことが携帯端末に起こったのか（例えば、着信したのか、メールを受信したのか、あるいはそれ以外なのか）を知らせられるようになる。

本研究では、振動通知の種類を増やすために、ファントムセンセーションを用いることを検討している。ファントムセンセーションとは、皮膚上の2点に対して同時に振動を提示された際、ユーザーが2点の間において単一の振動を感じるという、振動に関する錯覚現象の一種である。以降、ユーザーが振動していると感じられる場所を振動点と呼ぶことにする。

特に本研究では、2点に提示される振動の強度を徐々に変えることによって振動点を移動させられることを利用することにより、振動による方向提示を行う。

##### 2-2. 目的

本実験の目的は、振動による方向提示を行うために適切な振動の提示強度を調査することである。身体上の部位が違えば、同強度の振動が提示されても、ユーザーはそれらの振動の強度が同じであると知覚するとは限らない。このため、振動による方向提示をうまく行うには、2点に振動が提示された際に、ユーザーが知覚する振動の強度（以降、知覚強度）と提示されている振動の強度（以降、提示強度）の組み合わせを予め知る必要がある。

また、この調査結果を元に、適切な方向提示を行う振動（以降、移動振動）の条件を調査する。

##### 2-3. 実験の内容

実験1：本実験では、2点に提示された振動の知覚強度が同じになるように実験参加者に提示強度を調節してもらう。

実験2：移動振動を提示し、その方向を実験参加者に回答してもらう。

#### 3. 実験方法

##### 3-1. 研究参加者

金属アレルギー、レジニアレルギー、および化粧品アレルギーを持たない成人を、学内掲示板における情報掲示により募集する。情報掲示の例を図1に示す。また、十分な実験参加者が得られなかった場合、実施責任者および実施分担者経由の機縁募集により参加を依頼する。機縁募集にあたっては、実験参加者の自由意思による応募であり、強制ではないことを明確に伝える。また、実験参加者は任意の時点で実験を中断することができる。実験参加者の人数は、いずれの実験においても、個々の条件の統計的な解析を可能とするために必要な数（20人程度）とする。

実験参加者には、実験へ参加した時間に対する報酬を支払う。なお、この時間は実験1においては5時間、実験2においては75分を想定している。このため、実験謝金を実験1においては4,600円、実験2においては1,150円（実験実施時の大学謝金規定に基づく）とする（参考：筑波大学の謝金規定は時給920円）。また、実験参加者が自己の判断において実験を中断する場合は、実験に参加した時間を算出し、謝金を支払う。

なお、本実験の実施にあたり考えられる身体的な負荷として、装着したデバイスによる

手指の不快感および視覚刺激による不快感から生じるストレス、および装着したデバイスによる手指の締め付けから生じる痛みが挙げられる。また、精神的な負荷として、不快感から生じるストレス、心理的圧迫、および疲労が挙げられる。これらを感じた場合、実験参加者は実験中いつでも速やかに、実験実施者に対してこれらについて申し出ることができる。その場合、実験実施者はこれらを和らげるための対処（参照：3-2）を行う。実験実施者が対処できないと判断した場合、または対処をした後も実験参加者がこれらを感じる場合、実験実施者は直ちに実験を中止する。

また、実験参加者が金属アレルギー、レジンアレルギー、および化繊アレルギーを持たないと思っている場合でも、実験参加者にこれらの発症またはアレルギー反応と思われる症状が現れた場合には直ちに実験を中止する。また、実験実施者は、実験参加者の全身状態（顔色、意識状態、脈拍、呼吸など）を確認した後、状況に応じて、他の人および救急車に連絡したり、応急処置として実験参加者を仰向けにして足を挙上する体位にしたりといった対応を取る。（参考：<https://allergyportal.jp/knowledge/anaphylaxis/>）

なお、実験1に参加した実験参加者が実験2にも参加した場合、実験1の終了後、72時間以上の間隔を設ける。

## 実験参加者の募集

### 研究課題名

振動による方向提示のための提示強度の調査

### 実験概要

- 図1に示す振動を提示するためのデバイスを装着していただきます。
- 提示される2つの振動の強度を同じ強度になるように調整していただきます。
- 実験後に、実験の内容に関するアンケートに回答していただきます。
- 調整した振動の強度およびその調整にかかった時間を収集します。



図1. 振動を提示するためのデバイス

### 実験参加条件

金属アレルギー、レジンアレルギー、および化繊アレルギーを持たない成人の方を対象としています。

### 所要時間

実験は4回に分けて行います。実験にかかる時間は、1回あたり70分程度です。各回は3時間以上の休憩を挟んで行い、1日あたり2回までとします。4回分の合計時間（各回の休憩時間は含みません）は、実験の説明およびアンケートの時間を含めて、計5時間程度の予定です。

### 謝金

4,400円（実験実施時の大学謝金規定に基づく）

### 実施場所

最初に総合研究棟B 10階 1024に来ていただきます。その後、総合研究棟B 9階 911-1、911-2、10階 1001、1014、1111のいずれかの部屋に移動して、実験を行います。

参加していただける方は下記のメールアドレスに連絡をお願いします。

実験責任者：筑波大学 システム情報系 志築文太郎

連絡先：[hidaka@inlab.cs.tsukuba.ac.jp](mailto:hidaka@inlab.cs.tsukuba.ac.jp)

### 図1. 実験依頼に用いる情報掲示の例

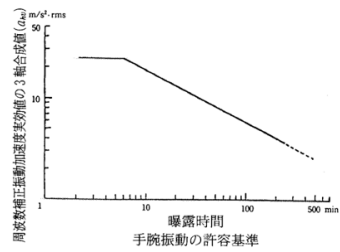
### 3-2. 実験装置

本実験において用いるデバイスには、振動を提示するためにリニア共振アクチュエータ (Linear Resonant Actuator, 以降、LRA) を用いる。本実験にて用いる LRA は LD14-002 (日本電産コバル電子株式会社) である。また、実験参加者に対して、振動を提示する場所 (以降、提示場所) に LRA を固定する際、実験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、固定には面ファスナおよび図 2 に示すような 3D プリントした固定具を用いる。また、実験参加者は、このデバイス 3 つをそれぞれ手首、非利き手の人差し指の付け根、および非利き手の人差し指の爪に装着する。このデバイスにおける振動の制御には Analog Discovery 2 を用いる。さらに、実験参加者は、LRA が振動を提示する際に発生する音により提示強度を知覚せずとも分かってしまうことを防ぐために、ヘッドフォンを装着する。また、実験実施者はヘッドフォンからホワイトノイズを流す。なお、ヘッドフォンの音量は実験参加者が装着時に調整する。実験参加者がヘッドフォンの音量を調整する際、実験実施者はホワイトノイズが聞こえるかつ最大音量の 60% 未満になるように調整するように指示する。また、実験参加者が、ヘッドフォンの音量が大きい、または小さいと感じた場合、実験中にいつでも調整できる。実験参加者はヘッドフォンを 3 セッション (セッションの実施内容は、3-3-3 節、および 3-4-2 節に示す。3 セッション行うのにかかる時間は実験 1 においては 18 分程度、実験 2 においては 9 分程度である) ごとに外し、3 分以上の休憩時間を設ける。

Analog Discovery 2 が出力する信号は、最大 5V、5mA であるため、人体には十分に安全である。本実験において用いる振動子は LRA (LD14-002、仕様：<https://akizukidenshi.com/catalog/g/gP-06838/>) である。また、この振動子による振動強度を測定したところ、振動強度は x 軸方向に  $1.0\text{m/s}^2$ 、y 軸方向に  $0.0\text{m/s}^2$ 、z 軸方向に  $0.0\text{m/s}^2$  であった。したがって、加速度の 3 軸合成値は  $\sqrt{1.0^2 + 0.0^2 + 0.0^2} = 1.0\text{m/s}^2$  (携帯のバイブレーションと同等の強度) である。なお、測定には振動測定器 HT-1201 (Akozon) を用いた。実験中、実験 1 においては、振動が提示される時間は 1 試行あたり  $1.5 \text{ 秒} \times 2 \text{ 回} = 3 \text{ 秒程度}$ 、実験全体においても  $12 \text{ タスク} \times 9 \text{ セッション} \times 4 \text{ 回} \times 3 \text{ 秒} = 21.6 \text{ 分程度}$  である。実験 2 においては、振動が提示される時間は 1 試行あたり最大 2.0 秒、実験全体においても  $18 \text{ タスク} \times 12 \text{ セッション} \times 2 \text{ 秒} = 7.2 \text{ 分程度}$  である。図 3 より、 $1.0\text{m/s}^2$  の振動を提示した場合にも、480 分以内であれば体に影響が出ないことが分かる。また、休憩も十分に取る。このため、振動を提示することによる身体への影響はないと考える。実験実施者は、これらのデバイスを実験参加者に装着してもらう。この際、実験参加者は面ファスナによる締め付けから生じる痛みを感じる可能性がある。実験参加者がこの痛みを感じた場合には、いつでも申し出ることができる。申し出があった際は、実験実施者が、面ファスナの締め付けを緩め、痛みを緩和させる。面ファスナの締め付けを緩めても、痛みがある場合、実験実施者は直ちに実験を中止する。



図 2. 本実験において用いたデバイス



手腕振動の許容基準

曝露時間 (分)	周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値 (m/s <sup>2</sup> -rms)
6分以下	25.0
10	19.4
15	15.8
30	11.2
60	7.92
90	6.47
120	5.60
150	5.01
180	4.57
210	4.23
240	3.96
270	3.73
300	3.54
330	3.38
360	3.23
390	3.11
420	2.99
450	2.89
480	2.80

図 3 手腕振動の許容基準 [2]

3-3. 実験 1 の実験設計 3-3-1. タスク

心理物理学実験における調整法[1]と同じ手順によってタスクを行う。実験参加者には、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。なお、振動が提示される時間は、振動ごとに1.5秒であり、2つの振動の間に1.5秒間の休憩時間、つまり何も提示されない時間が設けられる。提示された後、提示された2つの振動の内、比較振動を知覚強度が同じになるように提示強度を調整してもらう。なお、調整している最中、実験参加者は図4に示すような実験アプリケーションUI上にあるボタンを押すことができる。ボタンを押すことによって、実験アプリケーションは基準振動および調整後の提示強度となった比較振動を実験参加者に提示する。これによって、実験参加者はこの比較振動が基準振動と同じ知覚強度になったかを確認することができる。提示された2つの振動が等しい場合、実験参加者は、この比較振動が基準振動と同じ知覚強度となる提示強度であるとして、次のタスクへと移行する。また、図5にもタスクの流れを示している。



図4. 実験アプリケーションのUI

### 3-3-2. 実験の条件

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（以降、提示順序）、基準振動の提示場所、基準振動の提示強度、および比較振動の初期状態の提示強度（以降、比較振動の初期強度）である。

- 提示場所の組み合わせ（3通り）：
  - 爪、指の付け根
  - 爪、手首
  - 指の付け根、手首
- 提示順序（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、指の付け根」の場合、爪、指の付け根）
- 基準振動の提示強度（4通り）：
  - 4V、3V、2V、1V
- 比較振動の初期強度（3通り）：



0.1V、基準振動と同強度、5V

3-3-3. 実験全体の流れ

実験全体の流れを図5に示す。また、実験の最後に行う事後アンケートの詳細を図6に示す。なお、事後アンケートとしてGoogle Formを使ったアンケートを用いる。このアンケートには、参加者名の代わりに、実験参加者ごとに割り振った実験参加者番号を記入する。なお、アンケート結果は、パスワードをかけて保持し、ネットワークに接続されない外付けハードディスクに保存する。

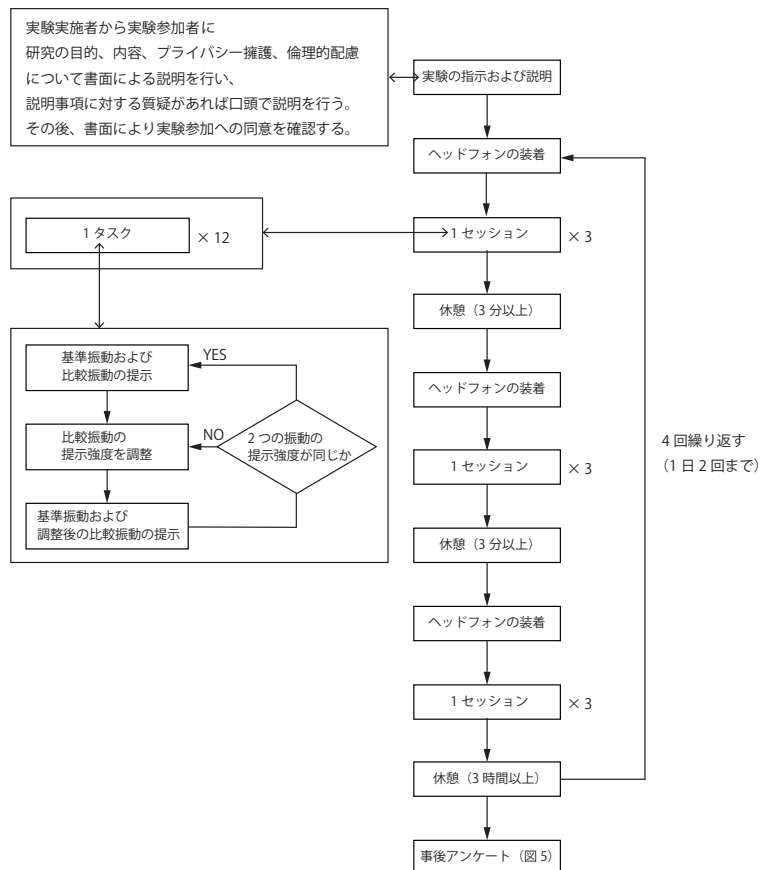


図5. 実験全体の流れ

## 提示強度の組み合わせの調査-実験回答 フォーム

実験に際して、基礎的な情報を教えてください

 hidaka@iplab.cs.tsukuba.ac.jp (共有なし)  
[アカウントを切り替える](#)



\*必須

参加者番号 \*

回答を入力

年齢を教えてください \*

回答を入力

性別を教えてください \*

男性

女性

その他: \_\_\_\_\_

利き手 \*

右手

左手

両手

スマートウォッチの使用経験を教えてください \*

使用したことがある場合は、何ヶ月使用したかを回答してください。使用したことがない場合は、特になしと回答してください。

回答を入力

スマートリングの使用経験を教えてください \*

使用したことがある場合は、何ヶ月使用したかを回答してください。使用したことがない場合は、特になしと回答してください

回答を入力

その他 \*

触覚に関する障がいがある場合はこちらに書いてください。特にない場合は「特になし」と回答してください

回答を入力

次へ

フォームをクリア

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング研究室 内部で作成されました。不正行為の警告

Google フォーム

## 提示強度の組み合わせの調査-実験回答 フォーム

hidaka@iplab.cs.tsukuba.ac.jp (共有なし)  
[アカウントを切り替える](#)

\*必須

### 振動の提示場所に関するアンケート

振動が提示された場所について教えてください

振動の提示場所として好ましかった場所を教えてください (1番目) \*

- 爪
- 指の根本
- 手首

振動の提示場所として好ましかった場所を教えてください（2番目）\*

- 爪
- 指の根本
- 手首

振動の提示場所として好ましかった場所を教えてください（3番目）\*

- 爪
- 指の根本
- 手首

このように選んだ理由があれば教えてください\*

回答を入力

振動の提示場所として感じやすかった場所はどこですか？（1番目）\*

- 爪
- 指の根本
- 手首

振動の提示場所として感じやすかった場所はどこですか？（2番目）\*

- 爪
- 指の根本
- 手首

振動の提示場所として感じやすかった場所はどこですか？（3番目）\*

- 爪
- 指の根本
- 手首

このように選んだ理由があれば教えてください \*

回答を入力

振動の強度を同じに調整しやすかった組み合わせはどれですか? (1番目) \*

爪および指の根本

爪および手首

指の根本および手首

振動の強度を同じに調整しやすかった組み合わせはどれですか? (2番目) \*

爪および指の根本

爪および手首

指の根本および手首

振動の強度を同じに調整しやすかった組み合わせはどれですか? (3番目) \*

爪および指の根本

爪および手首

指の根本および手首

このように選んだ理由があれば教えてください \*

回答を入力

戻る 送信 フォームをクリア

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング研究室 内部で作成されました。 [不正行為の報告](#)

Google フォーム

図 6. 実験において用いるアンケート

### 3-3-4. タスク数および実験の所要時間

タスク数について、実験参加者は、基準振動の提示強度 4 段階 × 提示強度の初期強度 3 段階 = 12 タスクを行うことを 1 セッションとし、提示場所の組み合わせおよび 3 回の繰り返しにより計 9 セッションを行い、これを 1 回とする。なお、実験は、1 日あたり 2 回まで行う。これを 2 日間、計 4 回の実験を行う。各回において、基準振動の提示場所お

よび提示順序の条件を変える。つまり、基準振動の提示強度 4 段階 × 提示強度の初期強度 3 段階 × 提示場所の組み合わせ 3 通り × 基準振動の提示場所 2 箇所 × 提示順序 2 通り × 繰り返し 3 回 = 432 回のタスクを各参加者に行ってもらおう。

実験全体の所要時間は、300 分程度を想定している。これは、以下の計算により得られる。

- 実験全体：70 分 × 4 回 + 10 分 + 10 分 = 300 分
  - 1 回：6 分 × 9 セッション + 6 分 + 10 分 = 70 分
    - ◇ 1 セッション (1 タスクは 30 秒程度)：30 秒 × 12 タスク = 6 分
    - ◇ 3 セッションごとに 3 分以上の休憩：3 分 × 2 回 = 6 分
    - ◇ デバイスの付け外しおよび確認：10 分程度
  - 説明およびアンケート：それぞれ 10 分

### 3-4. 実験 2 の実験設計

#### 3-4-1. タスク

参加者に、身体上の 2 箇所において振動が提示される。その後、参加者には、図 7 に示すような実験アプリケーションの UI に対して、振動点が動いたと思う方向をラジオボタンによって選択してもらう。選択後、UI の右上にあるボタンが選択できるようになるため、参加者はそのボタンを押すことにより回答を送信する。送信後、次のタスクが始まる (1 タスク：参加者が、振動を提示されてから回答を送信するまで)。なお、参加者には実験前の事前説明において、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は、分からないと回答できることを伝える。

#### 3-4-2. 実験の条件

実験の条件は、振動子に流す電圧の変化のさせかた (以降、電圧変化)、2 つの振動を提示する時の時間差 (以降、遅延時間)、振動の移動方向、提示場所の組み合わせ、および提示時間である。

- 電圧変化 (2 通り)：
  - 線形、対数
- 遅延時間 (3 通り)：
  - 同時、提示時間の半分 (途中から 2 つ目の振動が提示される)、提示時間と同じ (1 つ目の振動後、2 つ目が提示される)
- 移動方向 (3 通り)：
  - 図 7 における方向 1、方向 2、移動しない
- 提示場所の組み合わせ (2 通り)：
  - 爪-手首、指-手首
- 提示時間 (2 通り)：
  - 500ms、1000ms

なお、「移動方向」条件における「移動しない」を提示する場合、電圧の変化はなく、「遅延時間」条件を「同時」とする。

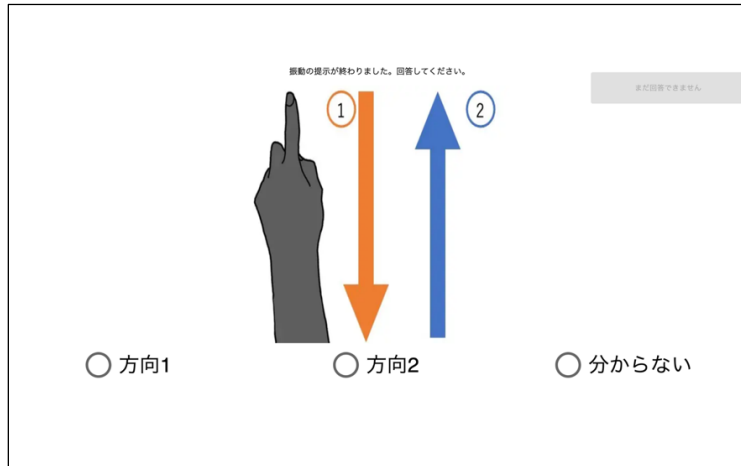


図 7. 実験 2 において使用するアプリケーションの UI

### 3-4-3. 実験全体の流れ

まず、参加者に実施者から研究の目的、内容、プライバシー擁護、倫理的配慮について書面による説明を行い、説明事項に対する質疑があれば口頭で説明を行う。その後、書面により実験参加への同意を確認する。さらに、タスクの説明を行い、説明事項に対する質疑があれば口頭で説明を行う。質疑がないことを確認した後、参加者にホワイトノイズが再生されたヘッドフォンを装着してもらう。ヘッドフォンを装着してもらった後、タスクが始まる（3-4-1 参照）。

タスク数について、実験参加者が、電圧変化 2 通り × 遅延時間 3 通り × 移動方向 3 通り = 18 タスクを行うことを 1 セッションとする。実験参加者には提示場所の組み合わせおよび提示時間毎に 3 セッションずつタスクを行ってもらおう。すなわち、実験を通して、参加者には、18 タスク × 提示場所の組み合わせ 2 通り × 提示時間 2 通り × 3 セッション = 216 タスクを行ってもらおう。

また、参加者には 3 セッションごとに 3 分以上の休憩を取ってもらおう。参加者には休憩の間、デバイスおよびヘッドフォンを外してもらおう。

なお、タスク終了後、参加者には事後アンケートに回答してもらおう。事後アンケートを図 8 に示す。事後アンケートには Google Form を用いる。このアンケートには、参加者名の代わりに、実験参加者ごとに割り振った実験参加者番号を記入する。なお、アンケート結果は、パスワードをかけて保持し、ネットワークに接続されない外付けハードディスクに保存する。

実験全体の所要時間は、75 分程度を想定している。これは、以下の計算により得られる。

- 実験全体：10 分 + 3 分 × 12 セッション + 9 分 + 10 分 + 10 分 = 75 分
  - 事前説明：10 分
  - 1 セッション（1 タスクは 10 秒程度）：10 秒 × 18 タスク = 3 分
  - 3 セッションごとに 3 分以上の休憩：3 分 × 3 回 = 9 分

- デバイスの付け外しおよび確認：10分程度
- アンケート：10分

- [1] 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.
- [2] 前田 節雄. 技術情報 人体振動の許容基準の動向. 安全衛生コンサルタント : 一般社団法人日本労働安全衛生コンサルタント会機関誌, Vol. 22, No. 61, pp.46-55, 2002.

### 移動振動の方向判別の精度調査に関する フォーム

hidaka@iplab.cs.tsukuba.ac.jp (共有なし)   
[アカウントを切り替える](#)

**\*必須**

**参加者番号 \***

回答を入力

**性別 \***

男性

女性

その他:

**年齢 \***

回答を入力



利き手はどちらですか \*

両利きの場合は、今回の実験でデバイスを装着しなかった方の手を回答してください。

右

左

スマートウォッチの使用経験を教えてください \*

使用したことがある場合は、何ヶ月使用したかを回答してください。使用したことがない場合は、なしと回答してください。

回答を入力

スマートリングの使用経験を教えてください \*

使用したことがある場合は、何ヶ月使用したかを回答してください。使用したことがない場合は、なしと回答してください。

回答を入力

触覚に異常はありますか? \*

過敏症や皮膚炎がある場合は回答してください。もし、ない場合はなしと回答してください。

回答を入力

今までに触覚を用いた実験をしたことがありますか \*

該当するか判断が出来ない場合は、実施者に相談してください。また、ない場合はなしと回答してください。

回答を入力

好ましかった実験条件の順番を教えてください \*

同じ順位のものがないようにしてください。

	1番好き	2番目に好き	3番目に好き	4番目に好き
NAILWRIST SHORT	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
NAILWRIST LONG	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
BASEWRIST SHORT	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
BASEWRIST LONG	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

上記の順位にした理由を教えてください\*  
 特にない場合は、なしと回答してください。

回答を入力

---

移動振動をはっきりと感じた（振動子間に新たな振動をはっきりと感じた）実験\*  
 条件の順番を教えてください  
 同じ順位のものがないようにしてください。

	1番感じた	2番目に感じた	3番目に感じた	4番目に感じた
NAILWRIST SHORT	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
NAILWRIST LONG	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
BASEWRIST SHORT	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
BASEWRIST LONG	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

上記の順位にした理由を教えてください\*  
 特にない場合は、なしと回答してください。

回答を入力

気がついたことがあれば教えてください\*  
 特にない場合は、なしと回答してください。

回答を入力

送信 フォームをクリア

図 8. 実験 2 において用いるアンケート

## A.2 実験1の同意書

同 意 書	
筑波大学システム情報系長 殿	
<p>私は、「課題名：振動による方向提示のための提示強度の調査」について、研究概要、方法、研究対象者の必要性、研究対象者に対するリスクと安全性、研究に参加する上で想定される危険の回避、ビデオ録画を含めた個人情報の保護について十分な説明を受けました。</p> <p>説明の際、本研究に協力することに同意しなくても何ら不利益を受けないこと、さらに、同意後も私自身の自由意思により不利益を受けず、参加の同意を撤回できることも理解しました。また、研究や実験の終了後であっても、枠下に指定の期日迄であれば、データ提供の同意を撤回できることも理解しました。私は、このことを理解した上で研究対象者になることに同意します。</p>	
令和 年 月 日	氏 名 _____ (署名)
「課題名：振動による方向提示のための提示強度の調査」の内容について、令和 年 月 日に説明を行い、上記のとおり同意を得ました。	
実施責任者 所 属 筑波大学 システム情報系	
氏 名 志築 文太郎 _____ (署名)	

データ提供の同意撤回の期限は同意書署名の日から\_60\_日後までとさせていただきます。  
研究や実験に協力した結果、不都合があった場合の連絡先  
実施分担者 (所属：筑波大学 情報理工学位プログラム (IPLAB) 氏名：日高拓真  
TEL：029-853-5165)  
実施責任者 (所属：筑波大学 システム情報系 氏名：志築文太郎 TEL：029-853-  
5520 )  
筑波大学 システム情報系 研究倫理委員会 事務局  
(システム情報エリア支援室 TEL：029-853-4989)

(裏面)

#### 1 研究の概要について

これから、実験参加者は、提示される 2 点の振動について、提示する強度が同じになるように調整していただきます。この調整の結果および調整にかかった時間を計測します。また、実験の最後に、アンケートに回答していただきます。このアンケートは、年齢、性別に加えて、振動の感じ方に関する調査のための質問を記載したものです。

尚、実験の所要時間は、5 時間を想定しています。

#### 実験参加者について

金属アレルギー、レジンアレルギー、および化学繊維アレルギーを持たない成人を対象としています。該当しない場合は実験監督者に申し出てください。

#### 謝金について

実験へ参加した時間に対する報酬を支払います。なお、実験へ参加した時間とは、実験の指示、実験中、事後アンケートのことを指します。また、この時間は 5 時間を想定しています。このため、実験謝金を 4,400 円（実験実施時の大学謝金規定に基づく）とします。また、実験参加者が自己の判断において実験を中断する場合は、実験に参加した時間を算出し、謝金を支払います。

#### データ管理について

管理場所 : SB1005 室

管理責任者 : 志築文太郎教授

学会・論文などでデータを発表する際は、データおよびデータを統計的に処理したものだけを用います。実験参加者を表現するためには記号・数字を用い、個人を特定できる情報は公表しません。ただし、実験参加者全体については性別、年齢の範囲、所属を公表します。実験において得た電子データはランダムな番号を設定し速やかに匿名化を施します。そのうえでパスワードをかけて保持し、ネットワークに接続されない外付けハードディスクに保存します。このハードディスク及び同意書等の紙媒体は鍵のかかるキャビネットに保管します。

#### データ処分方法について

期間終了後ハードディスクは物理的に破壊し、紙媒体はシュレッダーをかけて復元不可能な状態にしたうえで破棄します。また、同意の撤回を受け付けるために連結票を作成し、実験実施者以外には入れないようにパスワードを設定した PC に保管します。

#### 研究等を行う期間

研究倫理委員会承認後 ～ 2028 年 3 月 31 日

#### 備考

本実験は、ヤフー株式会社との共同研究となります。

#### 2 研究対象者の必要性、研究への参加におけるリスクと安全性、危険回避の方法について

本実験の参加は任意であり、参加に同意しないことによる影響は一切ありません。また、実験参加者が与えたインフォームド・コンセントについて、いつでも不利益を受けることなく撤回することができます。

実験に伴う心身上の負荷として、装着したデバイスによる手指の不快感および視覚刺激による不快感から生じるストレス、および装着したデバイスによる手指の締め付けから生じる痛みが挙げられます。また、精神的な負荷として、不快感から生じるストレス、心理的圧迫、および疲労が挙げられます。これらを感じた場合、実験参加者は実験中いつでも速やかに、実験実施者に対してこれらについて申し出てください。その場合、実験実施者はこれらを和らげるための対処を行います。実験実施者が対処できないと判断した場合、または対処後も実験参加者がこれらを感じる場合、実験実施者は直ちに実験を中止します。

実験参加者が金属アレルギー、レジンアレルギー、および化繊アレルギーを持たないと思われている場合でも、実験参加者にこれらの発症またはアレルギー反応と思われる症状が現れた場合には直ちに実験を中止します。また、実験実施者は、実験参加者の全身状態（顔色、意識状態、脈拍、呼吸など）を確認した後、状況に応じて、他の人および救急車に連絡したり、応急処置として実験参加者を仰向けにして足を挙上する体位にしたりといった対応を取ります。（参考：<https://allergyportal.jp/knowledge/anaphylaxis/>）また、実験中は十分な休憩を取られるように最大限配慮いたします。

心身上および精神的な負荷を和らげるために、本実験で用いる機器は実験開始前および実験終了後にアルコール綿を用いて拭くことにより除菌し、実験参加者に清潔な状態にて提供します。また、実験参加者に実験装置を装着した際、リニア振動アクチュエータを固定するために用いる面ファスナによる締め付けから生じる痛みを感じる可能性があります。実験参加者がこの痛みを感じた場合には、実験中いつでも申し出ることができます。申し出があった際は、実験実施者が面ファスナの締め付けを緩め、痛みを緩和させます。

健康被害が起きた場合、国立大学法人総合損害保険（国大協保）から損害補償します。研究成果公表の際、実験参加者から得られたデータは個人を特定できないように加工して使用いたします。

令和2年5月4日付新型コロナウイルス感染症対策専門家会議にて示された「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」を参考に、下記の対策を実施します。

- ・ 実験実施者および実験参加者は、実験日前 14 日間の健康状況観察を行い、発熱、風邪症状（咳・鼻水・のどの痛み・強い倦怠感・息苦しさ等）、ならびに明らかな誘因（舌の火傷・花粉症等）のない味覚・嗅覚障害等が無いことを確認します。
- ・ 実験参加者が入室する前に、実験室への入退室ならびに実験の際に実験参加者が触れ得る箇所をアルコール等の消毒液にて消毒します。また、実験中は実験室の換気を行います。
- ・ 実験を実施するにあたって、実験実施者および実験参加者のマスクの着用ならびに手指の消毒を徹底します。また、手指の消毒のために実験室の入口付近に消毒設備を設置します。
- ・ 本実験においては、実験参加者・実験実施者ともにマスクを外す必要はありません。
- ・ 同時に実験部屋に入る人数を、実験遂行に必要な最低人数である、実験参加者および実験実施者の 2 名とします。
- ・ 実験部屋は 70㎡の総合研究棟 B1001、50㎡の SB1014、および 35㎡の総合研究棟 B911-1、総合研究棟 B911-2、総合研究棟 B1111 とします。いずれの部屋も開けることが可能な窓があり、実験は窓・扉を開放状態で行います。なお、最小でも 35㎡の部屋を 2 名で使用するため、実験指示等の必要な時を除いて、実験参加者—実験実施者間の距離を十分に確保することができます。

研究に関する問い合わせは同意書署名欄下部に記載された連絡先（志築文太郎教授）までお願いします。

以下の内容に関して、確認および同意した項目へチェックをお願いします。

### 3 個人情報の保護について

- 実験中に、実験参加者の動作の分析および実験機器の異常発見のために、写真およびビデオの撮影を行う場合がありますが、外部への公開は致しません。
- 実験への参加は、協力者の自由意思によるものであり、実験への参加を随時拒否・撤回することができます。
- 学会・論文などでデータを発表する際は、データおよびそれを統計的に処理したものだけを用います。実験参加者を表現するために、記号・数字を用います。個人を特定できる情報は公表しません。ただし、実験参加者全体については、性別の実験参加者数、年齢の範囲、所属を公表することがあります。
- 実験において得たデータは全て暗号化された状態で論文発表後 10 年以上保存されます。暗号化に用いられるパスワードは本研究に関わる研究者のみが知っているものを使用します。なお、さらに安全を期すため、データに個人名が入ることはありません。個人名が記入された書類は研究期間の終了後シュレッダーにて粉砕されます。
- 上記以外のいかなる場合においても実験協力者のプライバシーは保全されます。

特記事項

- 実験中に不快感、痛み、ストレス等が生じて我慢ができない場合、すぐに実験実施者に教えてください。本実験を直ぐに中止します。

## A.3 実験2の同意書

同 意 書	
筑波大学システム情報系長 殿	
<p>私は、「課題名：振動による方向提示のための提示強度の調査」について、研究概要、方法、研究対象者の必要性、研究対象者に対するリスクと安全性、研究に参加する上で想定される危険の回避、ビデオ録画を含めた個人情報の保護について十分な説明を受けました。</p> <p>説明の際、本研究に協力することに同意しなくても何ら不利益を受けないこと、さらに、同意後も私自身の自由意思により不利益を受けず、参加の同意を撤回できることも理解しました。また、研究や実験の終了後であっても、枠下に指定の期日迄であれば、データ提供の同意を撤回できることも理解しました。私は、このことを理解した上で研究対象者になることに同意します。</p>	
令和 年 月 日	氏 名 _____ (署名)
「課題名：振動による方向提示のための提示強度の調査」の内容について、令和 年 月 日に説明を行い、上記のとおり同意を得ました。	
実施責任者 所 属 筑波大学 システム情報系	
氏 名 志築 文太郎 (署名)	

データ提供の同意撤回の期限は同意書署名の日から\_60\_日後までとさせていただきます。

研究や実験に協力した結果、不都合があった場合の連絡先

実施分担者 (所属：筑波大学 情報理工学位プログラム (IPLAB) 氏名：日高拓真  
TEL：029-853-5165)

実施責任者 (所属：筑波大学 システム情報系 氏名：志築文太郎 TEL：029-853-5520 )

筑波大学 システム情報系 研究倫理委員会 事務局

(システム情報エリア支援室 TEL：029-853-4989)

(裏面)

#### 1 研究の概要について

これから、実験参加者は、移動するように感じる振動が提示されます。提示された振動について、その方向を回答していただきます。回答結果および回答時間を計測します。また、実験の最後に、アンケートに回答していただきます。このアンケートは、年齢、性別に加えて、振動の感じ方に関する調査のための質問を記載したものです。  
尚、実験の所要時間は、75分を想定しています。

#### 実験参加者について

金属アレルギー、レジニアレルギー、および繊維アレルギーを持たない成人を対象としています。該当しない場合は実験監督者に申し出てください。

#### 謝金について

実験へ参加した時間に対する報酬を支払います。なお、実験へ参加した時間とは、実験の指示、実験中、事後アンケートのことを指します。また、この時間は75分を想定しています。このため、実験謝金を1,150円（実験実施時の大学謝金規定に基づく）とします。また、実験参加者が自己の判断において実験を中断する場合は、実験に参加した時間を算出し、謝金を支払います。

#### データ管理について

管理場所 : SB1005室  
管理責任者 : 志築文太郎教授

学会・論文などでデータを発表する際は、データおよびデータを統計的に処理したものだけを用います。実験参加者を表現するためには記号・数字を用い、個人を特定できる情報は公表しません。ただし、実験参加者全体については性別、年齢の範囲、所属を公表します。実験において得た電子データはランダムな番号を設定し速やかに匿名化を施します。そのうえでパスワードをかけて保持し、ネットワークに接続されない外付けハードディスクに保存します。このハードディスク及び同意書等の紙媒体は鍵のかかるキャビネットに保管します。

#### データ処分方法について

期間終了後ハードディスクは物理的に破壊し、紙媒体はシュレッダーをかけて復元不可能な状態にしたうえで破棄します。また、同意の撤回を受け付けるために連結票を作成し、実験実施者以外には入れないようにパスワードを設定したPCに保管します。

#### 研究等を行う期間

研究倫理委員会承認後 ~ 2028年3月31日

#### 備考

本実験は、ヤフー株式会社との共同研究となります。

#### 2 研究対象者の必要性、研究への参加におけるリスクと安全性、危険回避の方法について

本実験の参加は任意であり、参加に同意しないことによる影響は一切ありません。また、実験参加者が与えたインフォームド・コンセントについて、いつでも不利益を受けることなく撤回することができます。

実験に伴う心身上の負荷として、装着したデバイスによる手指の不快感および視覚刺激による不快感から生じるストレス、および装着したデバイスによる手指の締め付けから生じる痛みが挙げられます。また、精神的な負荷として、不快感から生じるストレス、心理的圧迫、および疲労が挙げられます。これらを感じた場合、実験参加者は実験中いつでも速やかに、実験実施者に対してこれらについて申し出てください。その場合、実験実施者はこれらを和らげるための対処を行います。実験実施者が対処できないと判断した場合、または対処後も実験参加者がこれらを感じる場合、実験実施者は直ちに実験を中止します。



実験参加者が金属アレルギー、レジンアレルギー、および化繊アレルギーを持たないと思われている場合でも、実験参加者にこれらの発症またはアレルギー反応と思われる症状が現れた場合には直ちに実験を中止します。また、実験実施者は、実験参加者の全身状態（顔色、意識状態、脈拍、呼吸など）を確認した後、状況に応じて、他の人および救急車に連絡したり、応急処置として実験参加者を仰向けにして足を挙上する体位にしたりといった対応を取ります。（参考：<https://allergyportal.jp/knowledge/anaphylaxis/>）また、実験中は十分な休憩を取られるように最大限配慮いたします。

心身上および精神的な負荷を和らげるために、本実験で用いる機器は実験開始前および実験終了後にアルコール綿を用いて拭くことにより除菌し、実験参加者に清潔な状態にて提供します。また、実験参加者に実験装置を装着した際、リニア振動アクチュエータを固定するために用いる面ファスナによる締め付けから生じる痛みを感じる可能性があります。実験参加者がこの痛みを感じた場合には、実験中いつでも申し出ることができます。申し出があった際は、実験実施者が面ファスナの締め付けを緩め、痛みを緩和させます。

健康被害が起きた場合、国立大学法人総合損害保険（国大協保）から損害補償します。研究成果公表の際、実験参加者から得られたデータは個人を特定できないように加工して使用いたします。

令和2年5月4日付新型コロナウイルス感染症対策専門家会議にて示された「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」を参考に、下記の対策を実施します。

- ・ 実験実施者および実験参加者は、実験日前 14 日間の健康状況観察を行い、発熱、風邪症状（咳・鼻水・のどの痛み・強い倦怠感・息苦しさ等）、ならびに明らかな誘因（舌の火傷・花粉症等）のない味覚・嗅覚障害等が無いことを確認します。
- ・ 実験参加者が入室する前に、実験室への入退室ならびに実験の際に実験参加者が触れ得る箇所をアルコール等の消毒液にて消毒します。また、実験中は実験室の換気を行います。
- ・ 実験を実施するにあたって、実験実施者および実験参加者のマスクの着用ならびに手指の消毒を徹底します。また、手指の消毒のために実験室の入口付近に消毒設備を設置します。
- ・ 本実験においては、実験参加者・実験実施者ともにマスクを外す必要はありません。
- ・ 同時に実験部屋に入る人数を、実験遂行に必要な最低人数である、実験参加者および実験実施者の 2 名とします。
- ・ 実験部屋は 70㎡の総合研究棟 B1001、50㎡の SB1014、および 35㎡の総合研究棟 B911-1、総合研究棟 B911-2、総合研究棟 B1111 とします。いずれの部屋も開けることが可能な窓があり、実験は窓・扉を開放状態で行います。なお、最小でも 35㎡の部屋を 2 名で使用するため、実験指示等の必要な時を除いて、実験参加者—実験実施者間の距離を十分に確保することができます。

研究に関する問い合わせは同意書署名欄下部に記載された連絡先（志築文太郎教授）までお願いします。

以下の内容に関して、確認および同意した項目へチェックをお願いします。

### 3 個人情報の保護について

- 実験中に、実験参加者の動作の分析および実験機器の異常発見のために、写真およびビデオの撮影を行う場合がありますが、外部への公開は致しません。
- 実験への参加は、協力者の自由意思によるものであり、実験への参加を随時拒否・撤回することができます。
- 学会・論文などでデータを発表する際は、データおよびそれを統計的に処理したものだけを用います。実験参加者を表現するために、記号・数字を用います。個人を特定できる情報は公表しません。ただし、実験参加者全体については、性別の実験参加者数、年齢の範囲、所属を公表することがあります。
- 実験において得たデータは全て暗号化された状態で論文発表後 10 年以上保存されます。暗号化に用いられるパスワードは本研究に関わる研究者のみが知っているものを使用します。なお、さらに安全を期すため、データに個人名が入ることはありません。個人名が記入された書類は研究期間の終了後シュレッダーにて粉砕されます。
- 上記以外のいかなる場合においても実験協力者のプライバシーは保全されます。

特記事項

- 実験中に不快感、痛み、ストレス等が生じて我慢ができない場合、すぐに実験実施者に教えてください。本実験を直ぐに中止します。

## 付録B 6.4節における訂正前の実験

初稿において提出した6.4節の実験2は、実験アプリケーションに間違いがあった。そのため、本稿の6.4節の結果は差し替えたものになっている。本章において、差し替え前の実験結果を載せる。

### B.1 差し替え前との差分

6.2節において、ダミー条件として、移動しない振動条件を追加した。しかし、実験アプリケーションにおいて、移動しない振動条件に遅延時間が付与されている条件があった。このため、移動しない振動条件を提示しているはずが、指から手首方向へと移動する振動を提示していた。

### B.2 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章）と同じ参加者である。

### B.3 結果および考察

図B.1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、方向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。

また、正答率に対して有意差の検定を行った。Shapiro-Wilkの検定を行ったところ、正規性はなかった（ $p = 3.05e - 08 < 0.05$ ）ため、ノンパラメトリックな検定を行う。遅延時間に対する検定のみ、3群以上の多重比較として利用される、Steel-Dwass検定を行った。提示時間、提示場所、および電圧変化に対する検定は、2群の比較として利用される、ウィルコク

表 B.1: 参加者に提示した方向条件（ダミー条件である移動しない条件を含む）および参加者の回答の混同行列. なお, 方向 1, 方向 2 とは, 図 6.1 に示す矢印の方向を指す.

(a) 遅延時間が 0.0 倍の場合.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	38.54	17.01	44.44
方向 2	10.42	54.51	35.07
移動しない	11.81	13.54	74.65

(b) 遅延時間が 0.5 倍（つまり, 提示時間が 1.0 s の場合は 0.5 s, 提示時間が 0.5 s の場合は 0.25 s 遅延される）の場合.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	86.46	6.94	6.60
方向 2	3.82	87.15	9.03
移動しない	86.11	4.86	9.03

(c) 遅延時間が 1.0 倍（つまり, 提示時間が 1.0 s の場合は 1.0 s, 提示時間が 0.5 s の場合は 0.5 s 遅延される）の場合.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	86.81	1.04	12.15
方向 2	2.08	87.50	10.42
移動しない	86.81	1.74	11.46

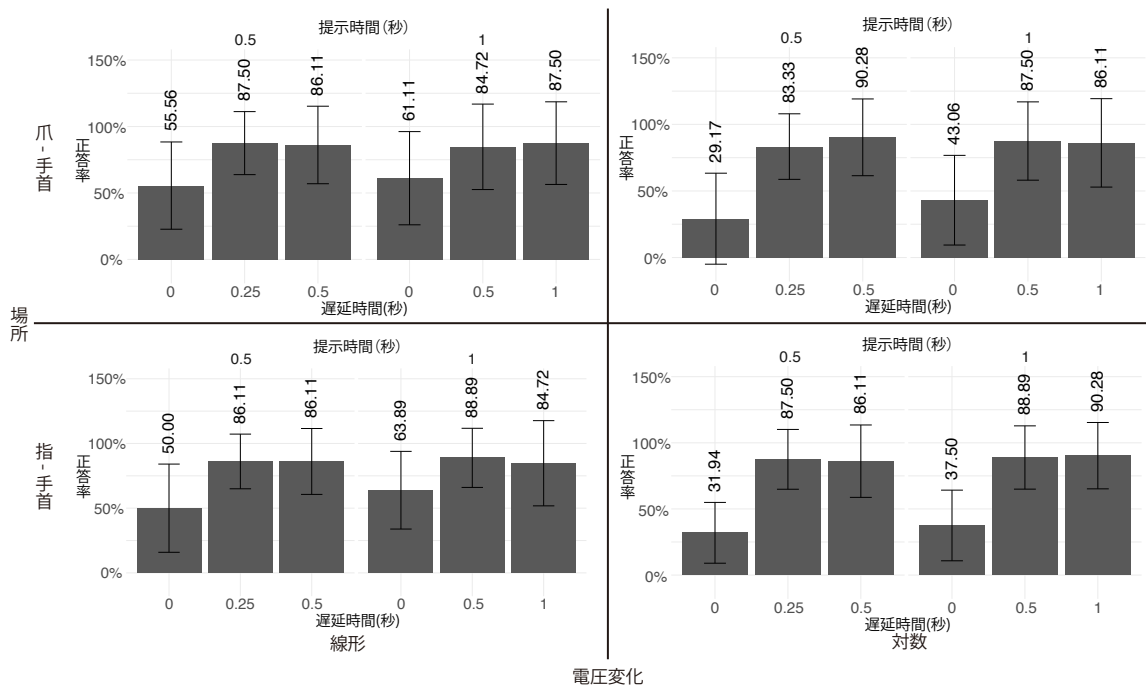


図 B.1: 参加者が正しく振動の方向を識別できた回数。エラーバーは標準偏差を表している。提示場所、電圧変化、遅延時間、および提示時間の組み合わせごとに6回の試行が行われている。また、変化しないダミーの条件は分析から除く。

ソンの符号付順位検定を行った。なお、 $p$  値が 0.05 未満の場合を統計的に有意であるとした。遅延時間について、0.0 倍および 0.5 倍、0.0 倍および 1.0 倍は有意差が確認された（いずれも  $p = 0.000$ ）。一方、0.5 倍および 1.0 倍は有意差が確認されなかった。提示時間、提示場所、および電圧変化については、いずれも有意差が確認された（提示時間： $p < 0.05$ 、提示場所： $p < 0.05$ 、電圧変化： $p < 0.05$ ）。

図 B.1 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る。

表 B.1 に遅延時間ごとにおける、参加者に提示した方向条件（ダミー条件である移動しない条件を含む）および参加者の回答の混同行列を示す。なお、方向 1 および方向 2 とは、図 6.1 に示す矢印の方向である。また、条件ごとの混同行列を B.4 節に示す。遅延時間 0.0 倍の場合、遅延時間が 0.5 倍および 1.0 倍と比べて、分からないと回答した割合が高い。このことか

表 B.2: 提示場所が指-手首, 遅延時間が 0 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	44.44	22.22	33.33
方向 2	19.44	55.56	25.00
移動しない	16.67	13.89	69.44

表 B.3: 提示場所が指-手首, 遅延時間が 0 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	27.78	19.44	52.78
方向 2	13.89	36.11	50.00
移動しない	13.89	11.11	75.00

らも, 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.

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.

## B.4 混同行列の詳細な結果

表 B.4: 提示場所が指-手首, 遅延時間が 0 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	55.56	8.33	36.11
方向 2	5.56	72.22	22.22
移動しない	16.67	11.11	72.22

表 B.5: 提示場所が指-手首, 遅延時間が 0 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	27.78	16.67	55.56
方向 2	22.22	47.22	30.56
移動しない	13.89	13.89	72.22

表 B.6: 提示場所が指-手首, 遅延時間が 0.25 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	86.11	11.11	2.78
方向 2	8.33	86.11	5.56
移動しない	86.11	11.11	2.78

表 B.7: 提示場所が指-手首, 遅延時間が 0.25 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	88.89	5.56	5.56
方向 2	5.56	86.11	8.33
移動しない	83.33	5.56	11.11

表 B.8: 提示場所が指-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	88.89	5.56	5.56
方向 2	0.00	88.89	11.11
移動しない	94.44	0.00	5.56

表 B.9: 提示場所が指-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	91.67	2.78	5.56
方向 2	2.78	86.11	11.11
移動しない	88.89	5.56	5.56

表 B.10: 提示場所が指-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	91.67	2.78	5.56
方向 2	5.56	80.56	13.89
移動しない	88.89	5.56	5.56

表 B.11: 提示場所が指-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	86.11	2.78	11.11
方向 2	5.56	86.11	8.33
移動しない	86.11	0.00	13.89

表 B.12: 提示場所が指-手首, 遅延時間が 1.0 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	80.56	0.00	19.44
方向 2	0.00	88.89	11.11
移動しない	86.11	2.78	11.11

表 B.13: 提示場所が指-手首, 遅延時間が 1.0 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	88.89	0.00	11.11
方向 2	0.00	91.67	8.33
移動しない	88.89	0.00	11.11

表 B.14: 提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	41.67	16.67	41.67
方向 2	0.00	69.44	30.56
移動しない	16.67	8.33	75.00



表 B.15: 提示場所が爪–手首，遅延時間が 0s，提示時間が 0.5 s，および電圧変化が対数の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	27.78	16.67	55.56
方向 2	11.11	30.56	58.33
移動しない	11.11	11.11	77.78

表 B.16: 提示場所が爪–手首，遅延時間が 0s，提示時間が 1.0s，および電圧変化が線形の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	52.78	11.11	36.11
方向 2	5.56	69.44	25.00
移動しない	5.56	19.44	75.00

表 B.17: 提示場所が爪–手首，遅延時間が 0s，提示時間が 1.0s，および電圧変化が対数の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	30.56	25.00	44.44
方向 2	5.56	55.56	38.89
移動しない	0.00	19.44	80.56

表 B.18: 提示場所が爪–手首，遅延時間が 0.25 s，提示時間が 0.5 s，および電圧変化が線形の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	86.11	5.56	8.33
方向 2	2.78	88.89	8.33
移動しない	83.33	0.00	16.67

表 B.19: 提示場所が爪–手首，遅延時間が 0.25 s，提示時間が 0.5 s，および電圧変化が対数の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	80.56	8.33	11.11
方向 2	2.78	86.11	11.11
移動しない	80.56	8.33	11.11

表 B.20: 提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	83.33	8.33	8.33
方向 2	8.33	86.11	5.56
移動しない	83.33	2.78	13.89

表 B.21: 提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	86.11	8.33	5.56
方向 2	0.00	88.89	11.11
移動しない	88.89	5.56	5.56

表 B.22: 提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	86.11	0.00	13.89
方向 2	2.78	86.11	11.11
移動しない	91.67	0.00	8.33

表 B.23: 提示場所が爪-手首, 遅延時間が 0.5 s, 提示時間が 0.5 s, および電圧変化が対数の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	88.89	0.00	11.11
方向 2	0.00	91.67	8.33
移動しない	86.11	0.00	13.89

表 B.24: 提示場所が爪-手首, 遅延時間が 1.0 s, 提示時間が 1.0 s, および電圧変化が線形の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	88.89	0.00	11.11
方向 2	0.00	86.11	13.89
移動しない	83.33	2.78	13.89

表 B.25: 提示場所が爪–手首，遅延時間が 1.0 s，提示時間が 1.0 s，および電圧変化が対数の場合における混同行列.

	方向 1 を回答した割合	方向 2 を回答した割合	分からないを回答した割合
方向 1	83.33	2.78	13.89
方向 2	2.78	88.89	8.33
移動しない	83.33	2.78	13.89