

振動を用いた方向提示における識別精度の予備調査

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、振動通知の種類が少ないため、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など）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、振動が用いられ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および振動子が提示する振動の強度の組み合わせの予備調査を行ったので、本稿においてその結果を示す。

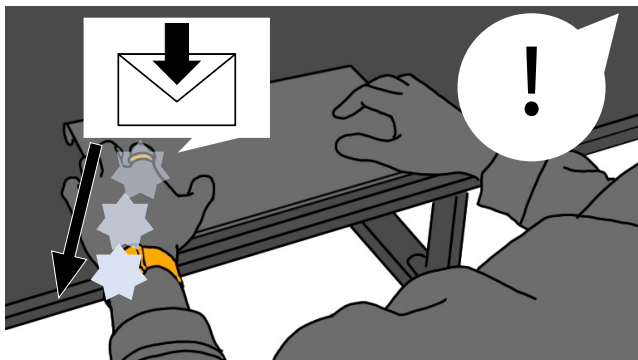


図 1 ユーザは、提示されるファントムセンセーションによる振動の方向に基づき通知の種類を識別できる。

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（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など）を知らせられるという利点がある。一方、振動通知の種類が少ないために、ユーザに多種の情報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、我々は方向情報が付与された振動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 [1] を手に対して提示す

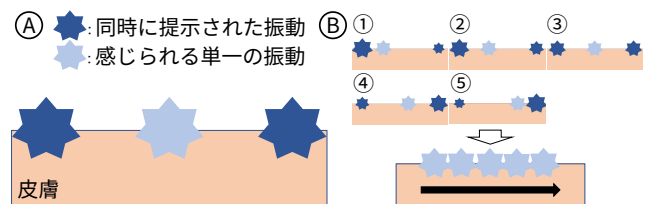


図 2 A) ファントムセンセーションが引き起こされる様子。B) 2箇所提示する振動の強度を変化させることにより、振動が感知される場所を制御できる。

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 [2]。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、今回、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の予備調査を行った。本報告においては、予備調査の結果を示す。

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

2. 手におけるファントムセンセーションを用いた方向情報の提示手法

ファントムセンセーション [1] 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 2 点の間における単一の振動として感じることができる錯覚現象である。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対し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、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。

ファントムセンセーション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 箇所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、一般的にユーザは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、ユーザが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 [3] というメリットを持つ。指への振動は、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 [4] 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 [5]。

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なるべく増やすことを目的とする。そのため、本節においては、ファントムセンセーションを用いた方向の提示 (以降、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から本研究を位置づける。

3.1 移動振動を用いた手法

移動振動を用いた手法も提案されている。例えば、ゲームにおけるエフェクト [6-9]、携帯端末の操作に対する振動フィードバック [10, 11]、および数字または文字などの情報の提示 [5, 12, 13] 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、皮膚を伸び縮みさせるという触覚刺激を用いた手法の調査 [14]、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 [15, 16]、および方向の識別精度を調査した研究 [17-22] 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 つの部位に対してファントムセンセーションを提示している。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でファントムセンセーションを用いている。

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 [23]、プレゼンテーションの残り時間 [24]、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 [25] 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、スライダーの変化量を知らせる [26] 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 [27] こと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、より多くの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り。一方、移動振動を用いた場合、間隔の組み合わせに基づくよりも、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. 各提示場所における適切な振動強度の調査

移動振動による振動通知を用いるにあたって、識別精度は高いほうが好ましい。このため、提示場所の組み合わせごとに、知覚強度が同じであると感じる振動の強度 (以降、提示強度) を調べる。例えば、提示場所を手首および指とする。この場合、手首へ提示強度 1 V の振動を提示した際、手首での知覚強度と指での知覚強度とが同じになるような指への提示強度を決定する。このようにして決定した提示強度の組み合わせの振動を順番に提示することによって、方向情報を付与した振動の識別精度が高くなると考えられる。

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、著者の以前の研究 [28] と同じく、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 (図 3A)。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



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 を取り付けたデバイス。B) LRA を手首および指に装着した様子。

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。

4.2 参加者

参加者は研究室の学生 4 名 (男性 3 名、平均年齢 23.5 歳、右利き 3 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 6 ヶ月、残りの参加者は使用したことがないと回答した。

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、比較振動の提示強度を 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 (この提示強度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、この提示強度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。参加者は実験を通してタスクを 432 回行う。なお、タスクを 12 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。参加者は、1 日あたりに 2 セットを行う。

続いて、実験の条件について述べる。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

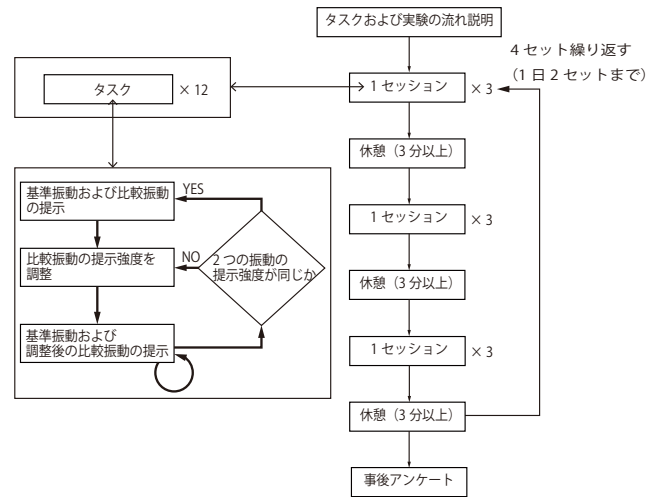


図 4 実験の流れ。

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)
- 基準振動の提示強度 (4 通り):
 - 4V, 3V, 2V, 1V
- 比較振動の初期状態の提示強度 (3 通り):
 - 0.1V, 基準振動と同強度 (例えば、基準振動が 2V の場合は、2V), 5V

最後に実験の流れについて述べる。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、基準振動の提示強度 (4 通り) および比較振動の初期状態における提示強度 (3 通り) を組み合わせた計 12 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。3 セッションのタスクが終わる度、つまり、提示場所の組み合わせ条件が変わる度、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。1 セット分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

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

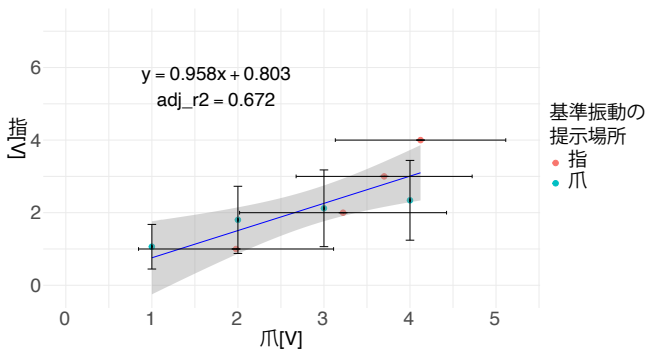


図5 提示場所の組み合わせが爪-指の場合における調整結果および線形回帰を行った結果。エラーバーは標準偏差を表している。また、灰色の範囲は、95%信頼区間である。

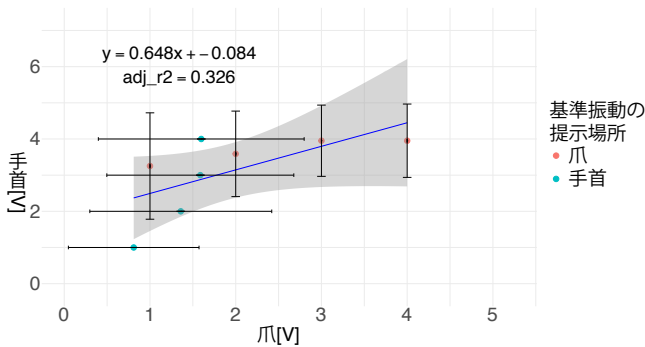


図6 提示場所の組み合わせが爪-手首の場合における調整結果および線形回帰を行った結果。エラーバーは標準偏差を表している。また、灰色の範囲は、95%信頼区間である。

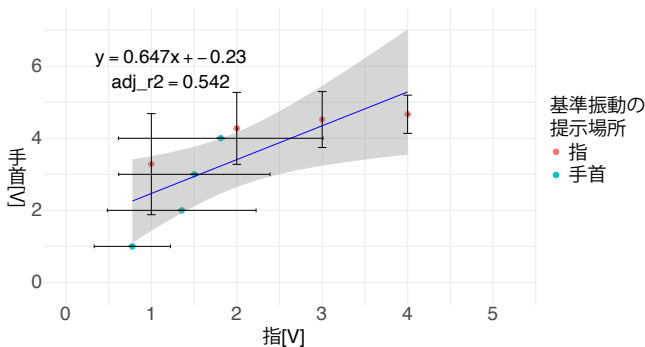


図7 提示場所の組み合わせが指-手首の場合における調整結果および線形回帰を行った結果。エラーバーは標準偏差を表している。また、灰色の範囲は、95%信頼区間である。

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250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)における参加者の回答および回答を線形回帰した結果を示す。なお、実験を実施した際、

連続した2日間において実験に参加した参加者は3名、2日空けた参加者は1名であった。これらの結果より、いずれの場合も回答の標準偏差が大きい。この原因として、振動の感じ方に対する個人差が大きいこと、また、同じ条件であっても、デバイスの取り付け場所や締付け具合が異なっていたことなどが考えられる。

なお、いずれの条件においても、標準偏差が大きいことから、方向提示を行う際には、提示場所の組み合わせごとにおける提示強度は、標準偏差の平均が小さい方の提示場所を基準振動とした場合における調整結果を使用する。例えば、図5では爪の回答の方が標準偏差が小さいので、提示場所の組み合わせとして爪-指を用いる場合には、爪の回答に基づき爪と指とに提示する振動強度を決定する。つまり、爪→指へと方向提示を行う際には、爪への振動強度を4V→1Vと変化させながら提示しつつ、同時に指への振動強度を1.06V→2.34Vとする。

5. 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。

5.1 実験参加者数の追加

本論文における実験参加者数は、4名と少なかった。実験参加者数を増やすことにより、実験結果の精度が向上すると考えられる。このため、実験参加者を追加して、同実験を行う。

5.2 提示強度の決定方法

方向提示を行う際に用いる提示強度は、調査結果より、標準偏差が大きいため、標準偏差の平均が小さい方の提示場所を基準振動とした場合における調整結果を使用した。本来、方向提示を行う際に用いる提示強度を決定する際には、知覚強度が同じになる提示強度の丁度可知差異(以降、範囲)を決定した後に、行う必要がある。しかし、標準偏差が大きい場合、この範囲を決定するのが難しい。このため、今後、範囲を決定する際には、標準偏差が大きい場合にも範囲として利用できるような条件において範囲を決定する必要がある。具体的に、以下に示す方法を用いることを考えている。

- 参加者の回答の分布を分析することによって、標準偏差を定数倍した値を範囲として用いる。
- 参加者ごとにキャリブレーションを行い、この結果から算出される標準偏差を範囲として用いる。

これらの方法を用いて、範囲を決定した後、方向提示を行う際に用いる提示強度を決定する。また、本論文において決定した提示強度および、これらの方法を用いた提示強度を用いて、提示方向の識別精度を調査し、その結果を比較

する予定である。

6. 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なるべく多くすることを目的とする。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ファントムセンセーション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可能にするために、振動を提示する場所ごとにおける振動の組み合わせを調査した。また、この結果を用いて、ファントムセンセーションを用いた方向を提示する際に、使用する振動の強度を決定した。今後、これらの強度を用いて、ユーザが提示された方向情報を識別する精度を調査する予定である。また、本論文において決定した振動の強度および、実験参加者数の追加および振動子が提示する振動の強度を決定する方法の変更などを行った後に決定した振動の強度を用いて、提示方向の識別精度を調査し、その結果を比較する予定である。

参考文献

- [1] Alles, D. S.: Information Transmission by Phantom Sensations, *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 85–91 (1970).
- [2] Hidaka, T., Sei, Y. and Shizuki, B.: Pilot Study on Notification Using Phantom Sensation on Hand, *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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] Matscheko, M., Ferscha, A., Riener, A. and Lehner, M.: Tactor Placement in Wrist Worn Wearables, *ISWC '10*, IEEE Computer Society, pp. 1–8 (2010).
- [6] 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, *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).
- [7] Israr, A. and Poupyrev, I.: Exploring Surround Haptics Displays, *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).
- [8] 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).
- [9] Israr, A., Kim, S.-C., Stec, J. and Poupyrev, I.: Surround Haptics: Tactile Feedback for Immersive Gaming Experiences, *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).
- [10] Gupta, A., Pietrzak, T., Roussel, N. and Balakrishnan, R.: Direct Manipulation in Tactile Displays, *CHI '16*, ACM, pp. 3683–3693 (2016).
- [11] Yatani, K. and Truong, K. N.: SemFeel: A User Interface With Semantic Tactile Feedback for Mobile Touch-Screen Devices, *UIST '09*, ACM, pp. 111–120 (2009).
- [12] Hsieh, M.-J., Liang, R.-H. and Chen, B.-Y.: NailFactors: Eyes-Free Spatial Output Using a Nail-Mounted Tactor Array, *MobileHCI '16*, ACM, pp. 29–34 (2016).
- [13] 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).
- [14] Horie, A., Kashino, Z., Shimobayashi, H. and Inami, M.: Two-Dimensional Moving Phantom Sensation Created by Rotational Skin Stretch Distribution, *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 139–144 (online), DOI: 10.1109/WHC49131.2021.9517252 (2021).
- [15] 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 (online), DOI: 10.1145/3432189 (2020).
- [16] 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*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 2487–2496 (online), available from <https://doi.org/10.1145/2702123.2702341> (2015).
- [17] 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).
- [18] Rahal, L., Cha, J., El Saddik, A., Kammerl, J. and Steinbach, E.: Investigating the Influence of Temporal Intensity Changes on Apparent Movement Phenomenon, *VECIMS '09*, IEEE, pp. 310–313 (2009).
- [19] 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).
- [20] Novich, S. D. and Eagleman, D. M.: Using Space and Time to Encode Vibrotactile Information: Toward an Estimate of the Skin's Achievable Throughput, *Experi-*

- mental Brain Research*, Vol. 233, No. 10, pp. 2777–2788 (online), DOI: 10.1007/s00221-015-4346-1 (2015).
- [21] 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).
- [22] 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).
- [23] Saket, B., Prasojo, C., Huang, Y. and Zhao, S.: Designing an Effective Vibration-Based Notification Interface for Mobile Phones, *CSCW '13*, ACM, pp. 149–1504 (2013).
- [24] 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), available from (<https://doi.org/10.1145/2470654.2466223>) (2013).
- [25] Liao, Y.-C., Chen, Y.-C., Chan, L. and Chen, B.-Y.: Dwell+: Multi-Level Mode Selection Using Vibrotactile Cues, *UIST '17*, ACM, pp. 5–16 (2017).
- [26] 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).
- [27] Pariti, J., Tibdewal, V. and Oh, T.: Intelligent Mobility Cane - Lessons Learned from Evaluation of Obstacle Notification System Using a Haptic Approach, *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).
- [28] 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).
- [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).