



スマートフォンの側面で皮膚電気刺激をする ユーザインタフェースの検討

User interface with skin electrical stimulation on the sides of the smartphone

高見太基¹⁾, 齋藤大雅¹⁾, 亀岡嵩幸¹⁾²⁾, 梶本裕之¹⁾

Taiki TAKAMI, Taiga SAITO, Takayuki KAMEOKA, and Hiroyuki KAJIMOTO

- 1) 電気通信大学 大学院情報学専攻 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1,
{takami, saito, kameoka, kajimoto}@kaji-lab.jp)
- 2) 日本学術振興会 (〒102-0083 東京都千代田区麹町 5-3-1)

概要：スマートフォンにおけるユーザ体験の向上のために高解像度な触覚提示が提案されている。しかし、分布的な触覚提示を実現するには多数のアクチュエータが必要であるため、筐体が大型化する、消費電力が大きいなどの問題を抱える。我々はこれを解決する手法として、軽量薄型の電気刺激装置を用いた端末側面への皮膚電気刺激インタフェースを提案する。本稿では特に左右二列の電極アレイによる電気刺激を実装し、端末を把持する指や母指球での二点弁別閾を調査した。
キーワード：触覚、電気刺激、ユーザインタフェース

1. はじめに

現在のスマートフォンは、ディスプレイの高解像度化と大画面化が顕著にみられ、様々なアプリケーションのUIやコンテンツを提示し、ユーザを視覚的に魅了している。また、音響技術も発達し、立体音響などを用いた臨場感のある聴覚体験を実現している。一方、入力動作のフィードバックやコンテンツ提示に伴う触覚提示技術はバイブレーション機能を中心としたものが多い[1][2]。人間の手は他の部位と比較して豊富な触覚受容器を備えているが、その多様な感覚知覚や器用さは最大限に活かされていない。

これを解決する試みとして様々なアプローチが検討されている。Fujitsu は、超音波振動による摩擦低減技術を応用して、様々な材質感や触感を提示できるタブレットを開発した[3]。Kajimoto[4]は、透明な電気触覚ディスプレイを開発し、スマートフォンの画面に設置することで、映像と電気刺激、さらに接触領域判定を可能とするプロトタイプを示した。Khurelbaatar ら[5]はスマートフォンの背面に電気触覚ディスプレイを配置し、電極に触れた指にタッチの感覚を提示している。

これらの研究では主に画面やデバイス背面を対象として触覚を提示しているが、我々はスマートフォンの側面に着目した。我々の観察によれば多くのユーザがスマートフォンを把持しているとき、利き手で把持しているかどうかにかかわらず、特に触覚受容器が多い指腹付近を側面に多

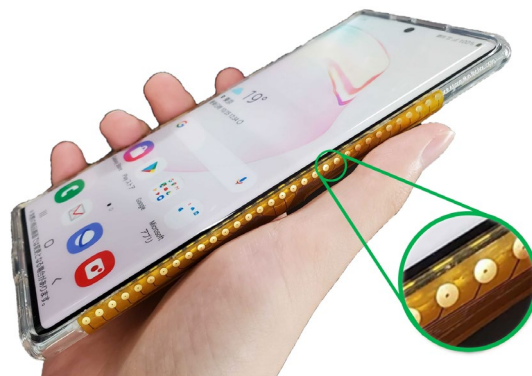


図 1：側面電気刺激インタフェース

く接触させている。このことから側面への提示により従来の手法と比べて容易に多くの触覚受容器にアクセスできると考えられる。

スマートフォン側面へ触覚を提示する試みとして Luk ら[6]は親指に対して圧電アクチュエータを用いた皮膚変形を行い、様々な触覚アイコンを提示した。Jang ら[7]はピンアレイを用いた形状ディスプレイを提案している。このディスプレイは、側面全体への触覚提示というコンセプトで先行する試みであるが、機械的に駆動されるピンマトリクスによって実装されているため多数のアクチュエータが体積をとり、片側面への提示にとどまっている。この方式で両側面に実装する場合2倍の厚みとなり、把持が困難

になると考えられる。さらに消費電力の課題もあると考えられる。

本研究では、スマートフォン側面への新たな触覚提示手法として皮膚電気刺激を提案する。皮膚電気刺激は軽量かつ薄型の実装が容易であり、また低電力にて駆動可能であるため携帯型バッテリー等を組み合わせたモバイルユースでの活用が可能である。本稿では、スマートフォンの左右両側面に電極アレイを一つずつ設置した皮膚電気刺激インターフェース(図1)を作成した。本稿では実装の詳細と、基礎的な性能評価として把持部の接触領域における二点弁別閾を調査した結果について述べる。

2. 電気刺激装置

電気刺激は、Kajimoto[8]の電気刺激装置の制御部分と側面電気刺激用のスイッチング基板、フレキシブル基板を用いて行った。電気刺激装置は電流量や刺激のパターンを指令する制御部(図2(a))とスマートフォンの背面に設置するスイッチング回路部(図2(b))、二列の電極からなる刺激提示部(図2(c))で構成されている。なお、制御部はPCとUSB接続されている。

スイッチング回路部は、制御部からの信号をスイッチング素子 HV513 (Microchip Technology 社製) を用いてスイッチングし、任意の電極での電気刺激を可能とする。

刺激提示部はフレキシブル基板となっており、スマートフォンの側面に沿うように変形できる。1列の電極には32点の円形電極(直径2mm)を電極中心間距離3.75mm間隔で配置した。また、片側面の一部にスマートフォンの物理ボタンがあることを考慮し、その部分は電極を配置せず21点とした(図2(c))。

スイッチング回路部(カバー含む)と刺激提示部の重量は19.4gであり、厚みは5.5mmである。なお、フレキシブル基板の長さは使用するスマートフォン(プロトタイプにはGalaxy Note 10+: 77.2mm×162.3mm×7.9mmを使用)の寸法に依存するが、それによる重量の変化は軽微である。

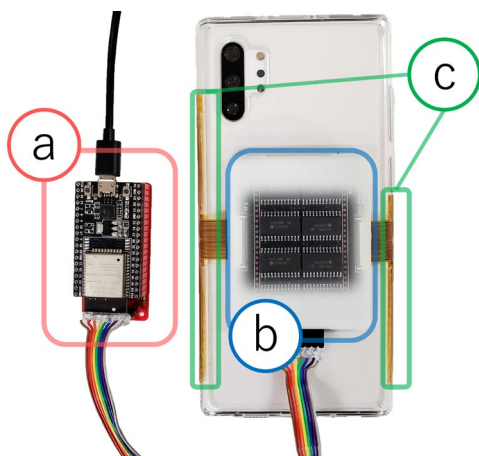


図2: 電気刺激装置 ((a): 制御部, (b): スイッチング回路部, (c): 刺激提示部)

3. 二点弁別閾の計測実験

3.1 実験概要

本実験は、提案手法の設計評価を知覚評価により行うものであり、作成した装置の電極の間隔と二点弁別閾の関係を調査することで設計の妥当性を検証する。スマートフォンの物理ボタンの制限により、二列の電極アレイは左右対称な設計になっていないので把持する手の形を統制する必要がある。本実験では図3のように右手で把持し、左側面には少なくとも中指と薬指が接触するようにして、右側面には親指と母指球が接触するように統制した。左側面は手の大きさによっては人差し指、中指、薬指、小指を全て並べて把持することが困難な場合が存在するため、本実験では比較的強くスマートフォンを握り込む中指と薬指を対象とした。また、左側面で並ぶ指同士が接触する利用ケースも考慮し、これを対象に加えた。従って、中指、薬指、中指-薬指、親指、母指球の5つの条件で二点弁別閾を計測した。「中指-薬指」条件では中指と薬指を隣合わせ、刺激点の片方が中指、もう片方が薬指となる状態での実験となる。今回の実験では、被験者は異なる二点を同時に電気刺激され、一点と感じたか二点と感じたか回答してもらう二肢強制選択法を用いた。



図3: 把持の仕方

3.2 被験者

実験は被験者7名(著者2名、男性6名、女性1名、22-24歳、平均22.6歳)に対して行った。利き手は右手6名、左手1名であった。

3.3 実験の手順

被験者は図3のように把持した状態で中指、薬指、中指-薬指、親指、母指球の5つの条件で実験を行った。

電気刺激は陽極刺激(刺激点を陽極とし、周囲の他の電極すべてをグラウンド電極とする刺激)で刺激周波数60Hz、パルス幅50 μ sとした。各々の条件の実験開始前には、接触している電極での電気刺激が十分に知覚できるパルス高さに調整した。

被験者は各条件で二点を同時に1秒間隔で電気刺激される。二点の組み合わせは、条件の指もしくは母指球が接触している電極の内、中心から対称に電極間距離を離して

いくように組み合わせられる。被験者はそれぞれの組み合わせを 10 回ずつランダムに刺激され、刺激点を一点と感じたか二点と感じたかの二肢強制選択で回答する。

以上の操作を 5 条件すべてに対して行った。

3.4 実験結果

各条件の二点弁別の結果を図 4 に示す。横軸の隣接距離は刺激する二点の電極間ステップ数を指し、例えば刺激する二点の間に電極が一つある場合は 2 となる。縦軸は二点と感じた割合を示しており、今回は全被験者の平均を採用している。また、図中の曲線は正規累積分布関数によるカーブフィッティングの結果である。フィッティングの過程で得られる各条件における主観的等価点、つまり回答率が 50% となる隣接距離を、本論文では 2 点弁別閾値と扱う (表 1)。

母指球を除いた全ての条件の 2 点弁別閾値は約 1.5~2.0 であり、隣接距離が 3 以上であれば弁別確率 90% 以上となる。電極中心間距離は 3.75mm であるので、電極が 11.25mm 離れていれば明瞭に二点に感じる事がわかる。

一方、母指球の二点弁別における主観的等価点は他条件の約 3 倍にあたる値となり、弁別能力が著しく低い結果となった。さらに、被験者による実験に対するコメントとして、母指球の二点弁別に言及するものが多くみられ、「全体的に刺激がもやとしてしている」「1 点と感じるものにいるんな範囲のものがあった」「線形に感じる」「位置によって刺激強度がかわっているように感じる」「上から下に流れているように感じた」等のコメントが得られた。

他のコメントとしては、中指-薬指条件において「中指と薬指のそれぞれで刺激する電極の距離が近いとき、指の境目で強い一点を感じる」という感想が多くみられた。

表 1: 各条件での主観的等価点
(電極中心間距離を 1 とする)

条件	2 点弁別閾値
中指	1.71
薬指	2.01
親指	1.69
母指球	5.75
中指-薬指	1.63

4. 考察

全ての条件において隣接距離が 1 のときの 2 点弁別確率は 30% を下回ったことから、少なくとも 2 点弁別の観点からは電極間中心距離をこれ以上縮める必要はないと考えられる。ただし今回求めたものは同時刺激の際の 2 点弁別閾であり、経時的に刺激した場合に刺激点が移動したことを知覚する閾値(point localization threshold)は通常の二点弁別閾よりも小さいことが知られており、この点は注意が必要である。

また、母指球を除いた全条件での 2 点弁別閾が 2 前後であることと 3 以上であれば弁別確率 90% 以上であることを考慮すると、我々の電気刺激インタフェースは 2 点弁別

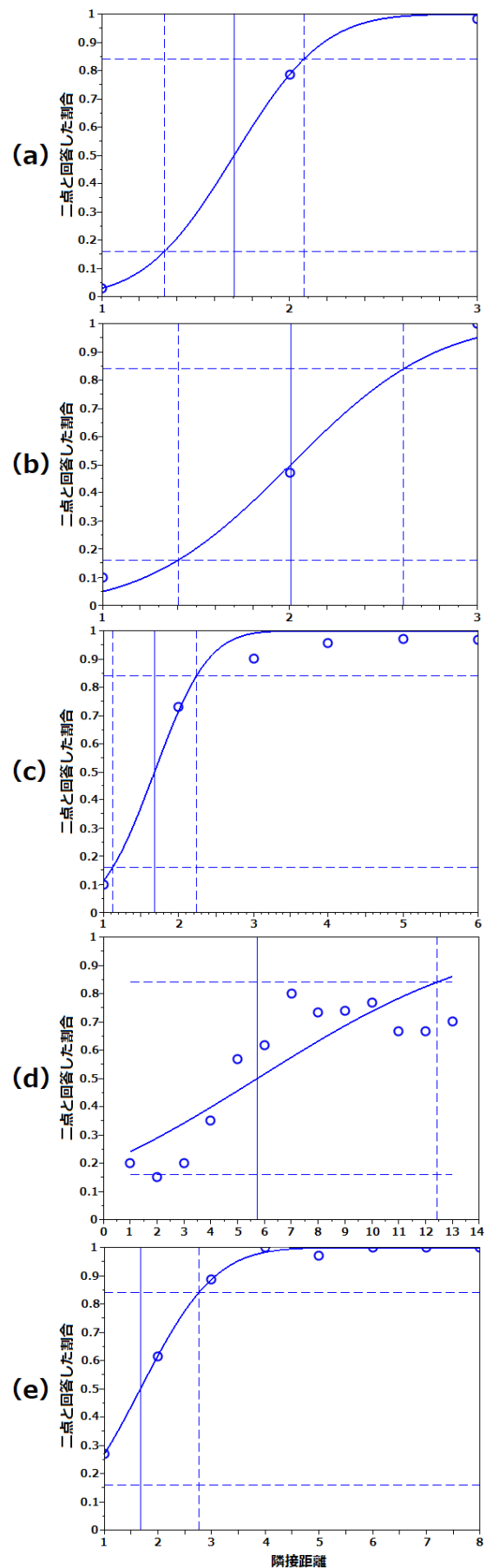


図 4: 各条件での弁別能力
(a): 中指, (b): 薬指, (c): 親指,
(d): 母指球, (e): 中指-薬指)

の観点からは電極密度が高すぎるということは無く、1点から2点へのなだらかな刺激が可能な最適な設計であることが示唆される。

母指球に関しては、弁別確率が全体的に乱高下していることと、2点と回答する割合が最も高くて8割に満たないことから、母指球周辺の機械受容器の分布密度が手指と比べて低いことが示唆される。実際に Johansson ら[9]が行った微小電極を用いた神経生理学的実験の結果が同様のことを明らかにしている。また、被験者のコメントの「もやっとした感覚」や「線のような感覚」などのようにユーザによって複数感覚が生起する母指球での皮膚電気刺激では、複数の刺激点数を認知させることを目的としたユースケースは適切でないと考えられる。

なお機械的な刺激に対する2点弁別域としては、年齢に強く影響されるが今回の実験被験者のような若年層では指で2mm程度、掌部で8ないし9mm程度とされている[10]。今回の結果はこの2倍以上程度の値であり、機械的な刺激に比べてやや解像度に劣ると考えられる。一つの可能性としては、刺激の際、刺激電極を陽極とし、他の電極をすべて陰極としているため、電流が隣の電極まで拡散しており、ある程度「広い」刺激となっている可能性はある。この点については電極配置の変更なども検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では手のもつ豊富な触覚受容器を活かしてスマートフォンでのユーザ体験を向上させるため、端末側面への皮膚電気刺激を提案した。最初の試みとして、側面に二列の電極アレイを設けたプロトタイプを作成し、把持部の手指や母指球の二点弁別閾を調査した。その結果、隣接距離が1のときの弁別確率は30%以下であり、母指球以外での隣接距離が3以上になると弁別確率90%以上になるとわかった。このことから、我々の電極間隔の設計の妥当性が示された。また、母指球は他の手指と比べた機械受容器の分布密度が低いことから弁別能力が低くなったと考えられ、ユースケースに制限があることがわかった。

今後の展望として、二点弁別の結果に準じたアプリケーションを作成し、ユーザスタディを通して側面皮膚電気刺激インタフェースの可能性を探る。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20K20627 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Fukumoto and T. Sugimura, “Active click: tactile feedback for touch panels,” In Proceedings of the 2001 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp. 121–122.
- [2] K. Yatani and K. N. 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, 2009, pp. 111–120.
- [3] “触感が得られるタッチパネルを搭載したタブレットを試作,” 富士通株式会社, [オンライン]. Available: <https://pr.fujitsu.com/jp/news/2014/02/24.html>.
- [4] H. Kajimoto, “Skeletouch: transparent electro-tactile display for mobile surfaces,” In SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies, pp. 1–3.
- [5] S. Khurelbaatar, Y. Nakai, R. Okazaki, V. Yem, and H. Kajimoto, “Tactile Presentation to the Back of a Smartphone with Simultaneous Screen Operation,” In Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp. 281–284.
- [6] J. Luk, J. Pasquero, S. Little, K. MacLean, V. Levesque, and V. Hayward, “A role for haptics in mobile interaction: initial design using a handheld tactile display prototype,” In Proceedings of the 2006 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 171–180.
- [7] S. Jang, L. H. Kim, K. Tanner, H. Ishii, and S. Follmer, “Haptic edge display for mobile tactile interaction,” In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 3706–3716.
- [8] H. Kajimoto, “Electro-Tactile Display Kit for Fingertip,” in IEEE World Haptics Conference 2021 Work-in-Progress.
- [9] R. S. Johansson and A. B. Vallbo, “Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin,” J Physiol, 1979, pp. 283–300.
- [10] J. C. Stevens and K. K. Choo, “Spatial Acuity of the Body Surface over the Life Span,” Somatosensory and Motor Research, 1996, pp. 153–166.