



固着・滑り制御型触覚ディスプレイにおける 皮膚吸引による接線力提示手法の検討

長谷川知紀¹⁾, 境侑里¹⁾, 上田潤²⁾, 田川和義^{1,3)}

Tomoki HASEGAWA, Yuri SAKAI, Jun UEDA, and Kazuyoshi TAGAWA

- 1) 富山県立大学大学院 工学研究科 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180, {hasegawa, sakai, tagawa}@tagawalab.org)
2) 富山県立大学 工学部 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180, ueda@tagawalab.org)
3) 立命館大学 総合科学技術研究機構 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150, 19v00710@gst.ritsumei.ac.jp)

概要: 筆者らは皮膚吸引による固着・滑り制御型触覚ディスプレイを提案している. 本ディスプレイは接線力・法線力の同時提示と高密度化の両立が見込まれるが, 任意の接線力と法線力の独立提示手法の検討が必要である. 本研究では, 簡易プロトタイプを作成し, 一定の吸引パターンにおける異なる吸引圧を用いた際の各デューティ比率が摩擦感提示に与える影響を主観評価により調査する.

キーワード: 触覚ディスプレイ, 固着・滑り制御, 吸引

1. はじめに

ヒトの皮膚には機械受容器という触覚センサが分布しており, これらが皮膚変形を電気信号に変換して脳に伝達することで触覚が生じる. この自然の触覚メカニズムを人工的に再現する装置として, 触覚ディスプレイは古くから研究開発が進められており, 大別して「垂直振動アレイ」「水平振動アレイ」「摩擦変調」「電気刺激」の四つの方式に分類できる[1]. その中でも摩擦力変調型は, 表面に振動や高電圧を印加して摩擦力を制御し, 接線方向の摩擦感を提示する手法である. 静電誘導方式[2]では, 提示面に高電圧を印加して表皮と面の間に吸着力を生じさせ, 高速応答かつ大きな摩擦力増幅を可能にするが, 高電圧回路や環境・皮膚状態変動による性能不安定性が課題となっている.

一方, 超音波摩擦制御方式は, 約 20–40 kHz 帯の超音波振動により表面と皮膚間に薄い潤滑膜を形成し, 摩擦力を低減することで触感を発生させる技術である. この方式では低電圧かつ数百 Hz 帯域の摩擦変調が可能で, Hiroshi Fujimoto らの研究[3]では, 40 kHz, 0~2.5 μm の振幅変化によって主観的滑りやすさを 4 段階に制御できることが示された. ただし, 超音波方式はあくまで摩擦力の低減に特化しており, 接線方向の滑り感提示に限定されるため, 摩擦力の増幅や法線方向の圧覚提示は行えないという制限がある.

そこで本研究では, 異なる吸引圧と各吸引パターンにおける接線力提示が摩擦感提示に与える影響を調査することを目的とする. 提案手法は, 吸引孔を高密度に配列した

アクリル板を用いて, その裏面に電磁弁を配置し, 吸引パターンを高速に印加・解放するものである. 吸引圧の印加で皮膚を瞬時に吸着させ指先の固着もしくは法線方向の圧感を提示し, 解放することで滑りを発生させ接線方向の stick-slip を制御し, 摩擦感を同一デバイス上で再現できる点が本手法の大きな特徴である. 提案ディスプレイの実現性を検証するため簡易プロトタイプを製作し, 固定吸引パターンにおける吸引圧・デューティ比を変化させた際の被験者による主観評価のを行い, 吸引圧・デューティ比と摩擦感の相関を調査する.

2. 提案手法

2.1 吸引圧による固着・滑り制御型触覚ディスプレイ

本研究では, stick-slip 現象を忠実に再現するため, 指先の固着と滑りを吸引圧で能動的に制御する新たな触覚ディスプレイを提案する. 図 1 に示すように, 本装置は微細孔を複数配列した提示面の裏側に吸引圧を印加・解放する仕組みを採用している.

2.1.1 摩擦感提示手法

一つ目は, 吸引圧により接線方向と法線方向の双方で触覚提示が可能になることである. 従来の摩擦力変調型ディスプレイでは, 摩擦力と垂直方向の圧力を同時に提示することは難しい. しかし, 吸引で皮膚を固定した後解放する際, 指腹自体が振動し, 接線方向の摩擦感を生成すると同時に, 先行研究で示された吸引圧による法線方向への圧覚[4]を活用して法線方向の触覚も与えることができる.

2.1.2 高密度化

二つ目は、吸引圧方式を用いることで機構を極力単純化しつつ高密度化が図れる点である。ピンアレイ[5]や電気刺激型システム[2]とは異なり、各孔が個別の駆動素子が必要としないため、吸引孔を狭ピッチで大量に配置することで、より高解像度かつ精緻な触感提示を実現できる。本研究は、この吸引圧駆動により指先の固着・滑りを自在に制御し、接線・法線両方向の同時提示の困難性を克服する新しい触覚ディスプレイの開発を目指す。

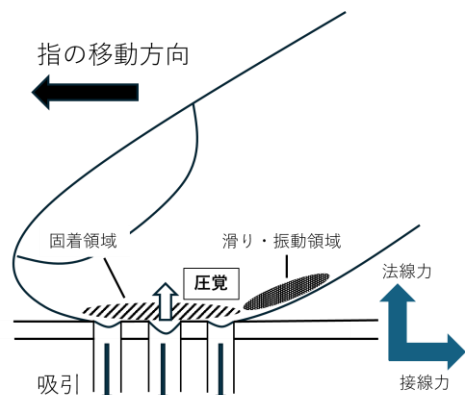


図1：固着・滑り制御型触覚ディスプレイ概要

2.2 ディスプレイ構成

本稿で用いる実験システムは、大別して「吸引部」「制御信号発信部」「真空供給部」の3要素から構成される（図2）。吸引機構には、直径1.0 mmの吸引孔を6個配置したアクリル板を用い、その下部にKoganei社製3ポートソレノイドバルブ（K3-100VF-24-LL）を配置した。バルブは通電時で触覚ディスプレイより吸引、無通電時で大気開放という吸引圧切り替え機構を備えており、アクリル板の吸引孔へ瞬時に吸引圧を印加・解放できる。駆動回路には、ProtoSupplies社MOSFETモジュールを用いて、24 V/5 A可変ベンチ型電源（ACH-305B）からの直流電力を制御する。制御信号はSiglent SDG5082ファンクションジェネレータで矩形波（デューティ比20%～80%）を生成する。真空供給系は外部真空ポンプからの吸引圧を電磁弁へ供給する。

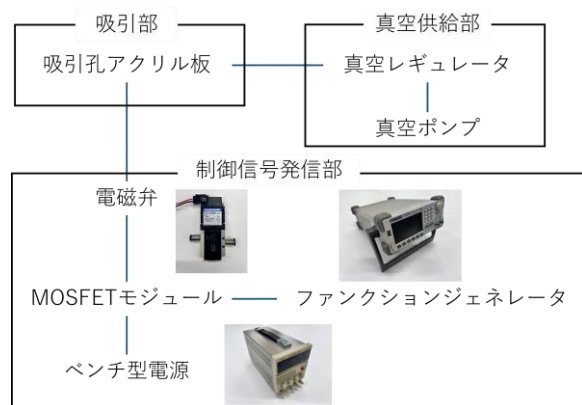


図2：実験システム概要

2.3 吸引部

本実験で用いた透明アクリル板は、厚さ1.0 mmの市販品（モノタロウ社製）を基材とし、直径1.0 mmの樹脂用超硬エンドミル（Ps2-1.0×5、同社製）で吸引孔を加工したものである。吸引孔径は、圧覚を誘発しつつ痛覚を生じさせない範囲に調整し、直径1.0 mmとした。これは、吸引圧を変化させた際に多様な摩擦力を提示できる最適な吸引孔直径の一つである[6]。また、圧覚を得られる最小径がおおよそ1.0 mmであることにも基づいている。吸引孔間隔は真空チューブ（最小肉厚0.5 mm）を各孔に接続するため、物理的制約から1.0 mm以上を確保した。本設計は、吸引孔の高密度配置と実用性の両立を目的としている。（図3）

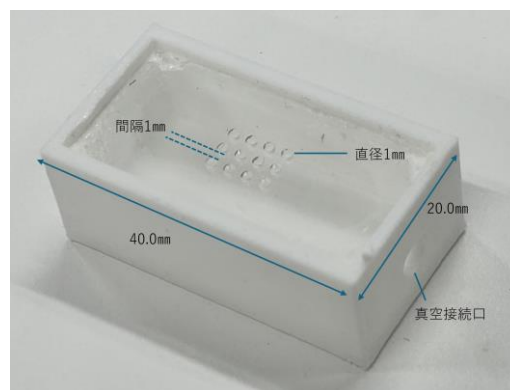


図3：吸引部概要

3. 実験

3.1 実験概要

本実験の目的は、提案ディスプレイにおいて固定周波数吸引パターンにおける、吸引圧およびデューティ比の変化が摩擦感に与える影響を調査することである。実験条件においては、吸引孔径を1.0 mmとし、摩擦感に違いを持たせるため吸引圧を-20kPa、-40 kPa、-60 kPaの3種類とし、吸引パターンについては先行研究[7]から30Hzで提示する。また、固着・滑りにおけるデューティ比は、固着期間が長いほどより粗さ感を強く感じることができるとするため、固着の比率を20%、40%、60%、80%で変化させる。実験では吸引圧・デューティ比の変化によって生じる「摩擦感」の違いを、6段階Likert評価により被験者から収集することで、吸引圧・デューティ比の関係性を検証する。

3.2 実験システム概要

実験装置は、リニアアクチュエータに指を固定し、指先がアクリル板に触れられる位置に配置する。直径1.0 mmの吸引孔を6個（2×3列）配置したアクリル板を20 mm/sの速度で指先を走査できる構成とした。吸引部には3ポート電磁弁を接続し、24 V電源と高速MOSFETモジュールを介して吸引圧パターンを印加・解放する。制御信号はファンクションジェネレータからの矩形波をデューティ比20%～80%で供給する。（図4）

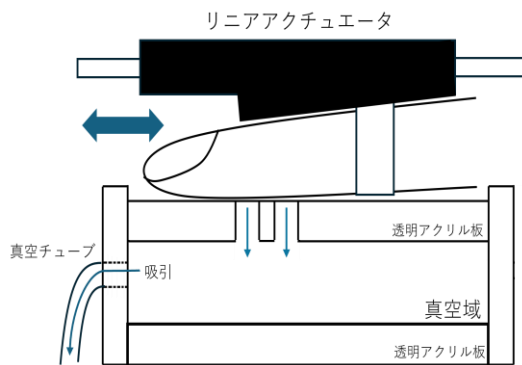


図 4：摩擦感提示装置概要

3.3 実験手順

実験は、被験者に本研究の目的と注意事項を十分に説明し、書面による同意を得てから、参加者にはリニアガイドで指先を一定速度（約 20 mm/s）に走査させる方法を習熟してもらい、試行前練習として 10 Hz の吸引パターンを 5 秒間体験して装置の動作と評価方法を確認する。慣熟後、一定吸引パターン（30Hz）のもと 3 種類の吸引圧条件（-20kPa, -40kPa, -60kPa）とデューティ比（20%, 40%, 60%, 80%）をラテン方格法に基づきランダム化した順序で提示する。本試行では各条件につき 5 セット行い、1 セットは走査開始音を合図に 10 秒間ガイド上を往復走査後、走査終了と同時に評価を行い、摩擦感を 6 段階で評価し、終了後に 1～2 分の休憩を行う。この流れを被験者がすべての条件を繰り返すことで、主観評価を順序効果なく収集する。全試行終了後は簡単な聞き取り調査を実施し、感じた触感について被験者の意見を収集して実験を終了する。

3.4 簡易実験

提案システム構築前の予備実験として、被験者 1 名（男性、20 代）で 30 Hz の吸引パターン制御を行い、各吸引圧-20kPa, -40kPa, -60kPa および各デューティ比 20%, 40%, 60%, 80% における摩擦感を確認した結果、異なるパラメータにおいて明瞭に摩擦感の変調を知覚できることを確認した。特に、吸引圧-60kPa およびデューティ比 80% の場合がもっとも摩擦感を強く感じ、それぞれのパラメータが弱まるにつれて摩擦感も弱くなっていきデューティ比が 20% の場合は一律して摩擦感をほぼ感じなかった。この結果から吸引圧やデューティ比を変化させることで様々な摩擦感を提示可能であると考えられ、提案手法における指先の stick-slip 制御による接線力提示手法として有効であることが示された。

4. おわりに

本研究では、皮膚吸引を用いた摩擦力変調型の触覚ディスプレイにおける接線力提示手法の検討として各パラメータが摩擦感に与える影響を主観評価にて調査する。

提案システムでは吸引孔径 1.0 mm のアクリル板と 3 ポート電磁弁を組み合わせることで、様々な周波数帯、吸引圧、デューティ比における摩擦力の変化を同一インタフェース上で再現可能とした。駆動回路には高速 MOSFET モジュールと矩形波信号を用い、瞬時の吸着から解放を安定して実現している。

実験では、被験者がそれぞれの吸引圧、デューティ比の条件での主観評価を行い、その結果を繰り返し測定・解析することで、摩擦感を提示における相関を明らかにする。

今後は、さまざまなテクスチャ感の提示における触覚提示手法の開発、および高速度カメラによる皮膚表面の固着・滑り挙動の可視化による動的 stick-slip 制御の開発を行う。これらを通じて、提案手法における触覚ディスプレイの完成を目指す。

参考文献

- [1] 下条 誠, 前野 隆司, 篠田 裕之, 佐野 明人 編: 触覚認識メカニズムと応用技術: 触覚センサ・触覚ディスプレイ, サイエンス&テクノロジー, pp. 399, 2010.
- [2] R. Le Magueresse, F. Casset, F. Giraud, M. Kazar Mendes, D. Mermin, R. Franiatte, A. Kaci and M. Colin : Reconfigurable Flexible Haptic Interface Using Localized Friction Modulation, IEEE Transactions on Haptics, 2025.
- [3] 東孝明, 宇治大河, 西村貴弘, 土井康樹, 藤本弘: 高周波振動子の振幅が摩擦低減効果の滑りやすさおよび動摩擦係数に与える影響, 人間工学, 57(4), pp.172-178, 2021.
- [4] 牧野聡一郎, 篠田信義: 吸引圧刺激による触覚生成法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 11-1, pp. 123-132, 2006.
- [5] Yusuke Ujitoko, Takaaki Taniguchi, Sho Sakurai, Koichi Hirota : Development of Finger-Mounted High-Density Pin-Array Haptic Display', IEEE Access, vol.8, pp.145107-145114, 2020.
- [6] 長谷川知紀, 田川和義: 固着・滑り制御型触覚ディスプレイの実現に向けた基礎的検討, 電気情報通信学会ヒューマンインタフェースシステム研究会 2025 年春季研究会講演論文集, 2025.
- [7] 田川和義, 井垣友貴, 田中弘美: 指紋を有する指先の stick-slip シミュレーション, VR 学会大会第 24 回大会講演論文集, 2019.