

導電性インクの両面印刷による電気刺激と静電吸着を用いた複合触覚ディスプレイの作成手法

加藤 邦拓^{*†} 石塚 裕己[‡] 梶本 裕之[§] 宮下 芳明^{*}

概要. 人間は外部からの複数の刺激の組み合わせにより触覚を知覚しており、よりリアルな触覚を再現するためには、複数の触覚ディスプレイを組み合わせることが必要となる。本研究では、電気刺激と静電吸着に着目し、それらを同時に提示可能な複合触覚ディスプレイの作成を検討する。提案手法では、導電性インクと家庭用のインクジェットプリンタを用い、触覚ディスプレイを構成する電極を専用紙上に両面印刷することで作成する。本研究では、提案する複合触覚ディスプレイ実現のために必要な要件を示し、作成した触覚ディスプレイの耐久評価を行った。これにより複数刺激をによる触覚を提示可能な触覚ディスプレイが容易にでき、より豊富な触覚を提示可能なアプリケーションへの応用が可能となる。また電気刺激と静電吸着の複合触覚ディスプレイによる摩擦感と垂直方向の振動を組み合わせることで、表面の質感や凹凸のような感覚を提示することができる。これにより、例えば印刷した絵や写真などを見るだけでなく、触覚情報と併せて楽しむことも可能となる。

1 はじめに

人間の皮膚内部には複数種類の受容器と呼ばれる細胞が存在しており、この受容器が受けた外部からの刺激によって人間は触覚を知覚している。この受容器に対して外部から何らかの手法により刺激を与えることで、触覚を提示する「触覚ディスプレイ」に関する様々な手法が検討されてきた。

一方で、こうした触覚ディスプレイを作成するためには、いくつかのハードルがある。まず、触覚提示をするための専用のハードウェアを用意し、アクチュエータや電子回路を組み合わせた実装が必要となる。また、人間の触覚メカニズムを考慮すると、より豊富な触覚を提示するためには、複数刺激を組み合わせた触覚を提示することが望ましいといわれている [3]。しかし、複数刺激を組み合わせた触覚提示手法に関する研究は、単体の刺激提示手法に比べ多くはなされておらず、それらによって人間はどのような触覚を感じるかについても明らかにされていない。これらのことから、複数の刺激を与えることのできる、より高品質な触覚ディスプレイを作成し、アプリケーション開発に応用することは容易でないのが現状である。

本研究では数ある触覚提示手法の中で特に単純な構成で実現が可能な「電気刺激」と「静電吸着」に着目し、これら 2 種類の触覚提示手法を組み合わせた複合触覚ディスプレイの作成を検討する。提案手

法では導電性インクと家庭用のインクジェットプリンタによって電極パターンを両面印刷することで作成する。作成した電極パターンを電源に接続し、交流電圧を印加するだけで触覚ディスプレイとして使用できる。これによりユーザは電気刺激による垂直方向の振動と静電吸着による摩擦感を組み合わせた触覚を感じることができる。そのため、よりリアルな触覚を提示可能な触覚ディスプレイを手軽に作成できる。また、低コストでの実装が可能のため、触覚を用いたアプリケーションの開発や、異なる刺激を組み合わせた触覚ディスプレイの性能評価の試行錯誤として役立てることができる。

本稿では電気刺激、静電吸着のそれぞれの触覚提示についての特性を述べた上で、それらを両面印刷によって作成する手法を報告する。作成に必要な要件を示し、作成した複合触覚ディスプレイの耐久性について評価を行った。また、複合触覚ディスプレイを活用したアプリケーションを実装し、提案手法の有用性について議論する。

2 関連研究

触覚ディスプレイは主に、アクチュエータなどにより皮膚表面に刺激を与える手法と、電気刺激などにより皮膚内部の受容器を直接刺激する手法の 2 種類に分類できる。皮膚表面に刺激を与え触覚を提示する手法はこの他に、プラズマ放電や収束した超音波などを用いた手法などがある。

これらの手法に対し、刺激を与えるための専用のデバイスを使用せず、電圧を印加した電極のみを用いて触覚を提示する手法も検討されている。Strongらは 2 つの導電体の間に静電気力を生じさせること

Copyright is held by the author(s).

* 明治大学

† 日本学術振興会

‡ 香川大学

§ 電気通信大学

によって皮膚に摩擦感を提示する触覚ディスプレイを開発している [11]. Bau らの提案した TeslaTouch ではこの原理を応用し、タッチパネルディスプレイ上に表示したコンテンツに合わせた触覚をディスプレイ平面上に付与することを実現している [2]. また, Bau らの提案した REVEL では人体に電圧を印加し, GND 接続された導電体に触れることで静電吸着を引き起こす *Reverse-Electrovibration* を提案している [1]. Yamamoto らは内部に電極を有する 2 枚のシートに対して電圧を印加し, シート間で推力を発生させる手法を提案している [12]. また Nakamura らは複数の指先に対する触覚提示を目的とした, 静電吸着による触覚ディスプレイを開発している [8]. GND に接続された電極と, 電圧を印加した電極を持つパッドとの間に静電吸着による触覚を提示する手法を提案している. 本研究ではこれらの静電吸着による触覚提示のうち Nakamura らの手法を採用し, 電気刺激と組み合わせた複合触覚ディスプレイを実現する (詳細は次章にて述べる).

電気刺激は皮膚に接触した 2 つの電極の間に電圧を印加することで, 電極間に電流を流し皮膚内部に存在する受容器を直接刺激する方法である. この手法を応用し, Kajimoto は円筒上に多数の電極を形成し, 掌の任意の箇所に電気刺激を生じさせる触覚ディスプレイを提案している [4]. また Kitamura らは電極を針形状にすることで, 低い電圧値で電気刺激が可能な触覚ディスプレイを開発した [6].

ここまで述べた触覚ディスプレイは, それぞれ単体の刺激を用いることで触覚を提示する手法が殆どであった. 一方で, 皮膚内部に存在する 4 つの受容器はそれぞれ異なる刺激によって反応し, 人間は受容器が受けた複数の刺激の組み合わせによって物体の触覚を認識している. そのため「実物体の触覚再現」のような, より高度な触覚提示のためには, 異なる刺激を提示可能な触覚ディスプレイを複数組み合わせる使用することが有効である [3].

人間の皮膚に複数の刺激を与えることで触覚提示を行う手法については, 単体の刺激を与える手法に比べあまり多く検討されていないのが現状である. Yem らは電気刺激とモータによる振動やせん断力を組み合わせることで, 任意の受容器を刺激できる触覚ディスプレイ, FinGAR を提案している [13]. FinGAR は複数刺激の選択的な提示によって, 人間が実際にどのような触覚として知覚するかの調査を目的としている. 人間の持つ 4 つの受容器がそれぞれどのような特性の刺激によって活性化されるかは広く知られているが, 複数の刺激を組み合わせた触覚提示についての調査はあまり行われていない. また静電吸着と電気刺激の組み合わせによる複合触覚ディスプレイについては, これまで検討されていなかった. この他, Pyo らは 2 種類の静電アクチュエータを組み合わせることで摩擦力と振動を提示するこ

とが可能な触覚ディスプレイを提案している [10].

導電性インクに関する研究として Kawahara らは, イラストレータなどによりデザインしたパターンを印刷することで, 電子回路やセンサなどを作成する手法を提案した [5]. この他にも導電性インクによるアクチュエータ, ディスプレイ, ユーザインタフェース [9] など様々な応用がなされてきたが, 触覚ディスプレイの実現は検討されていない. 本研究では, 導電性インクを用いた電極によって触覚ディスプレイを作成する手法を検討し, そのために必要な要件を調査する.

3 触覚提示手法

本研究では静電吸着による摩擦感と, 電気刺激による振動を組み合わせた複合触覚ディスプレイの作成手法を検討する. 図 1 にそれぞれの手法および, 提案する複合触覚ディスプレイの構造を示す.

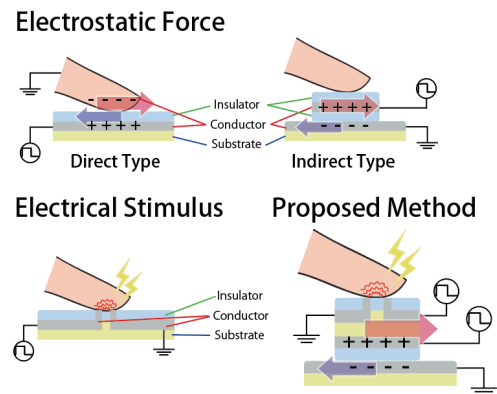


図 1. 静電吸着触覚ディスプレイ (上), 電気刺激触覚ディスプレイ (左下), 提案する複合触覚ディスプレイ (右下).

3.1 電気刺激による触覚提示

電気刺激は皮膚に接触した電極から人間の皮膚に電流を流すことで触覚を提示する手法である. 電気刺激触覚ディスプレイは 2 つの電極を持ち, 一方の電極には電圧が印加され, もう一方の電極は GND に接続される (図 1 左下). ユーザはこれらの電極を指で覆うように触れて使用する. 電極に電圧を印加することで, 電極間に接触した人間の皮膚に電流が流れ, 皮膚内部に瞬時的に電位差が生じ受容器を直接刺激する. これによりユーザは皮膚が垂直方向に振動しているような触覚を知覚することができる.

3.2 静電吸着による触覚提示

静電吸着による触覚提示は, 2 つの導電体が接近した際に発生する静電気力を用いることで, 触覚を提示する手法である. 一方の導電体に電圧を印加し, もう一方は GND に接続される. これらの導電体の

間に薄い絶縁層を挟み、電気的に接触しない状態で双方を接近させると、それぞれの導電体に逆向きの電荷が帯電し、静電気力の作用により吸着力が発生する。この時一方の導電体を固定し、一方の導電体を水平方向に動かすと導電体間に作用する摩擦力が増大し、ユーザはざらざらと引っかかるような摩擦感を知覚できる。また、この静電吸着を断続的に生じさせることで振動のような触覚も提示できる。

静電吸着による触覚ディスプレイは、人間の指と電極との間に静電気力を生じさせる Direct 型と、2つの電極間に静電気力を生じさせる Indirect 型の2種類がある [8]。図 1 上にそれぞれの基本構造を示す。Direct 型の特徴としては、人間の指を一方の導電体として扱っているため、デバイスをひとつに統合することができる。一方で、電極上の絶縁層を直接触れて操作を行うため、指先のコンディションによっては安定した刺激を得られないことがあるという報告もされている [1]。これに対し、Indirect 型では2つの電極間で静電気力を生じさせるため、指先のコンディションに影響されず安定した触覚を提示することができる [8]。本研究では静電気力と電気刺激を組み合わせた複合触覚ディスプレイを実現するため、Nakamura らの手法を採用し1枚の基板の表裏にそれぞれの電極を実装する (図 1 右下)。

4 実装

静電吸着と電気刺激による触覚の同時提示を実現するための要件は以下の通りである。

1. 人間の指先に電気刺激を与えるため、導電部分が露出した導電体を有する。
2. 静電吸着による吸着力を発生させるため、間に絶縁層を持つ2つの導電体を有する。

本研究では Indirect 型の静電吸着触覚提示を採用しているが、オブジェクトを直接触れている感覚を保つため、ユーザの指と触れるオブジェクト間の距離は極力小さくなるようデザインする。これらの要件を満たす触覚ディスプレイを容易に実現可能な構成として、本研究では導電性インクを用いた両面印刷による作成手法を提案する。図 2 に提案する複合触覚ディスプレイの基本構成を示す。電極は導電性インク印刷用紙上に印刷され、表面が電気刺激用、裏面が静電吸着用の電極として使用される。図 2 右上は印刷によって作成した電気刺激による触覚提示用の電極である。この電極は指先に接触させるための2つの円形パターンを持つ。円形パターンから伸びた配線部分は指先に接触しないように表面にテープを貼り絶縁する。これらの配線は左右の赤・青のリード線を通じて電源および、GND にそれぞれ接続される。電極パターンが印刷された面を上にし、ユーザは2つの円形パターンを一本の指で覆うように触れることで、垂直方向の振動や圧覚を感じることができる。

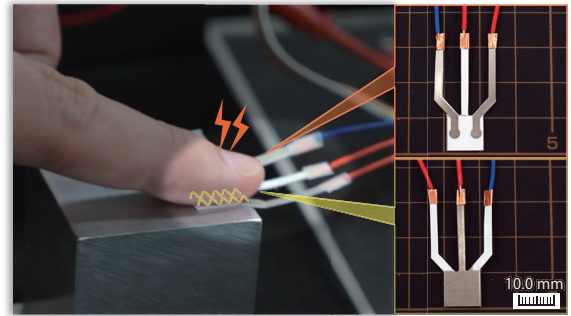


図 2. 複合触覚デバイス基本構成。表面：電気刺激用の電極 (右上)、裏面：静電吸着用の電極 (右下)。

図 2 右下は印刷によって作成した静電吸着による触覚提示用の電極である。この電極は、導電性インクによって印刷された正方形のパターンを持ち、表面には絶縁層として薄いテープが貼り付けられている。このパターンから伸びた配線が中央の赤いリード線を通じて電源に接続され、電圧が印加される。電極パターンが印刷された面を下にし、ユーザは触覚ディスプレイごと GND に接続された表面の滑らかな導電体上で指をスライドさせることで電極間で発生する静電吸着による摩擦や振動を感じることができる。

複合触覚ディスプレイは Adobe Illustrator によって作成した電極パターンを、家庭用のインクジェットプリンタ (Brother, MFC-J840N) によって印刷することで作成する。導電性インクには銀ナノ粒子インク (三菱製紙, NBSIJ-MU01) を使い、 $270\ \mu\text{m}$ の厚みを持つ導電性インク専用紙に両面印刷する。各電極は全体もしくは一部にテープを貼りつけることで絶縁層を形成する。電極には、マイコン (mbed LPC 1768, ARM Ltd) によって制御可能な電源装置 (MHV 12-1.0K2000P, Bellnix Co., Ltd) に接続され、最大で 600 V の電圧を印加することができる。

4.1 電極パターンデザイン

ここでは電気刺激および静電吸着用の適切な電極のパターン設計を検討する。電気刺激用の電極パターンについては、指先に接触する電極のサイズおよび2つの電極の間隔を決定する必要がある。電気刺激における電極サイズの影響についての研究では、振動を提示する電極を高密度に配置できるメリットを活かすことが重要であると述べられている [14]。一方、本研究では導電性インクを用いて電極を印刷することで作成しているため、作成可能な電極のサイズは使用するインクジェットプリンタの印刷精度に左右される。電極サイズが小さすぎると、断線を引き起こす可能性がある。ことから、電気刺激用の

電極パターンをサイズを直径 1.0 mm 以上の円形とし、電極間の距離を 1.0 mm に設定した。

次に、静電吸着用のパターンについては、電極裏面に印刷するパターンのサイズを決定する必要がある。静電吸着による触覚提示手法では、接触する電極の面積によって発生する吸着力が決まり、その強さは平行板コンデンサのモデルを用いて推定することができる。これを基に、既存研究 [8] では電極のサイズを直径 30 mm に設定している。これに対し本研究では、指先に装着するような触覚ディスプレイの作成も視野に入れているため、10 × 10 mm の大きさを採用した。これらのパラメータ設定により作成した複合触覚ディスプレイを、8 名の大学生・大学院生に実際に使用させた。その結果、電気刺激、静電吸着単体での触覚、およびそれらを組み合わせた複合触覚のすべてを被験者全員が知覚できたことを確認した。

4.2 電極の耐久性

提案する複合触覚ディスプレイは導電性インクを用い、家庭用のインクジェットプリンタによって印刷して作成する。そのためプリント基板や ITO を使用した電極を用いる既存手法に比べ、はるかに耐久性が低い。例えば、電極表面を爪などで強く引っ掻いたり、折り目がつくまで曲げてしまうと断線を引き起こすリスクがある。また、時間による劣化の可能性があるので、長期間の使用にも適していない。

ここでは更に、提案手法による触覚ディスプレイに指を載せ、実際に使用する時に起こり得る破損の可能性について議論する。提案する複合触覚ディスプレイでは、絶縁層を形成するために一部にテープを貼りつける必要がある。そのため、部分的に電極表面を保護することができ、断線のリスクを減らすことができる。しかし、電気刺激用の電極は印刷面が露出した状態で直接指に触れる必要があるため、使用中に破損につながる可能性が高いと考えられる。そこで、電気刺激用の電極について電圧を印加し、実際の使用時における耐久性の評価を行った。

4.2.1 電圧印加による耐久評価実験

実験では、電極に対し交流電圧を一定時間印加し続け、抵抗値の変化を測定する。定量的な評価を行うため、導電性ゲルを用いて 2 つの電極を覆うことでユーザが指で電極に触れて使用する状況を再現した。導電性ゲルには、2k Ω 以下のインピーダンスを持ち、人体の皮膚と近い性質を持つ心電図用ディスプレイ (フクダ電子株式会社, TEO-174DCR) を使用した。実際に電気刺激用の電極を使用する際と同じ状況を再現するため、導電性ゲルが接触する電極 (e,f) および、電源、GND、テストを接続する箇所 (a-d) を除く配線をテープを用いて絶縁する。

図 3 左上に示すように、実験用電極パターンは直

径 1 mm の 2 つの独立した電極 (e,f) を持ち、それぞれから 2 本の配線が伸びている。この 2 本の配線のうち、一方 (a,d) に電源または GND が接続され、導電性ゲルを通じて電極 e-f 間に電流が流れる。もう一方の配線 (b,c) は電極の抵抗値を測定するために用意したものであり、2 本の配線に対しテスターをあて、電源側、GND 側のそれぞれの電極の抵抗値を測定する。なお、人間の皮膚に近い性質を持つ導電性ゲルを使用しているため、電源側、GND 側の電極間での抵抗値を安定して測定することが難しい。そのため本実験ではそれぞれの電極の抵抗のみを計測することとする。電極 e, f には 500V, 100Hz の交流電圧を印加し、10 分おきに電源を止めてからそれぞれの抵抗値 (a-b 間, c-d 間) を測定をした。

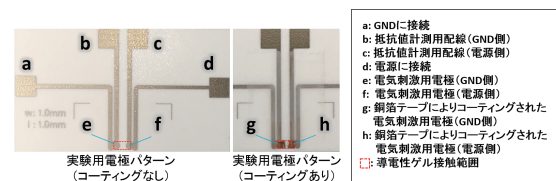


図 3. 評価実験用電極パターン。

4.2.2 結果

実験の結果、電源側の電極は 0~30 分までは抵抗値は一定になり、30~40 分の間から抵抗値が下がり始め 50 分には断線したことが分かった (図 4 左上)。一方、GND 側の電極では抵抗値の変化は見られなかった。

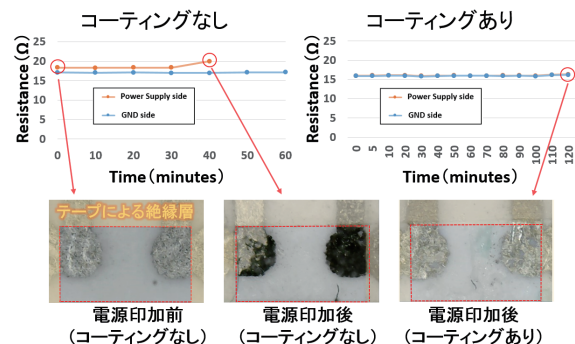


図 4. 耐久評価実験結果。

4.2.3 考察

実験前後に撮影した電極パターンを比較してみると、電極が一部黒く変色していることがわかる (図 3 左下, 中央下)。この変色は電源に接続された電極に特に顕著にみられ、断線の原因となったと考えられる。電源に接続していた電極に着目すると、テープにより表面が絶縁されていた箇所では変色が起きていないことがわかる。そのため、この現象は高電圧の印加が原因だけではなく、導電性ゲルの接触が関与していると推測される。

そこで、印刷された電極表面に銅箔テープを貼り付けることで表面をコーティングし、電気的な接続を確保しつつ電極と導電性ゲルとが接触しない状態で再度実験を行った。結果は図 4 右上のようになった。グラフから、電圧側および GND 側の両方の電極で、0～50 分まで間でも抵抗の変化がないことがわかる。その後も実験を継続し、120 分まで抵抗値の測定を行ったが、抵抗値の変化は見られなかった。実験後、使用した電極から銅箔テープを剥がし表面を観察したが、電極の変色は見当たらなかった (図 4 右下)。

以上の結果から、印刷によって作成した触覚ディスプレイを使用する際は、皮膚と接触する面を銅箔テープなどを用いてコーティングすることで電極の破損を防ぐことができるといえる。

電極のコーティングなしの状態では、実際に人間の指を当てて電気刺激触覚ディスプレイを使用したところ、同様の変色が確認された。これは指先などの皮膚の接触により印刷された導電性インクが何らかの物性変化を起こしていることが分かる。

5 アプリケーション例

5.1 ウェアラブル触覚ディスプレイ

提案手法による複合触覚ディスプレイを用い、複数の指に対して触覚を提示可能な VR グローブを試作した。紙や PET などの基板上に電極を印刷しているため、ユーザの手にフィットする柔軟性に優れた触覚ディスプレイを作成できる。この VR グローブを用い、表面の滑らかなオブジェクトに対し触覚を付与するアプリケーションを開発した。また、AR によってオブジェクトの見た目を変化させる。図 5a のようにユーザはアルミ製のキューブに触れながら、木材に触れているかのような触覚を感じることができる。

静電吸着による触覚提示は GND に接続された表面の滑らかな導電体上で使用する必要がある。提案手法では、この GND 接続された導電体も導電性インクによって作成できる。これにより、印刷した絵や写真に対して触覚を付与することができる。図 5b では波の描かれた絵に対し、低い周波数の交流電圧を印加することで触覚を提示している。提案手法を用いることで、印刷された絵や写真を視覚情報だけでなく、触覚情報と併せて楽しむことができるようになる。他にも、絵本や折り紙、ペーパークラフトなど、紙を扱った様々なコンテンツへの応用が考えられる。

5.2 インタフェースへの応用

提案手法では、紙や PET など柔軟な素材によって様々な形状の触覚ディスプレイを容易に作成することができる。任意の形に切り取ったり、曲面に沿って貼り付けたりといった、様々な使い方が考えられる。図 5c は、スライダ型のインタフェースへ応用し

た例である。このインタフェースは端にタッチ入力が発生させるための導電性パターンを持つ。タッチパネルディスプレイの端に、静電吸着用の導電体として使用される楕形の電極シートを貼り付ける。楕形の導電体パターンの特定の箇所でのみ、静電吸着による摩擦感が付与されることで、ユーザにスライダがスナップする感覚を提示することができる。また、印加する電圧を下げることで摩擦感をなくし、スムーズな操作が可能となる。電圧の強弱を制御し、それに応じてスライダによる入力が連続的/離散的に変化するアプリケーションを開発した。電圧を上げスナップ感を付与している状態ではその引っかかりに対応して数値が離散的に変化し、電圧を下げてスムーズに動かせる状態では数値が連続的に変化する。

図 5d は、提案手法により透明な印刷用紙を用いて格子状のパターンを印刷し市販のデスクトップモニタに貼りつけることで簡易的な TeslaTouch [2] を実装した例である。カメラによって手の位置を取得し、その動きに応じて提示する刺激の強弱を変化させることで、ディスプレイに表示されたコンテンツに合わせた触覚の提示が可能となる。

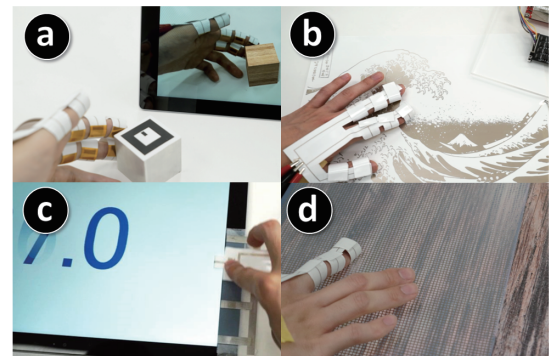


図 5. アプリケーション例

6 議論

本研究では、数ある触覚提示手法のうち電気刺激、および静電吸着による触覚提示に焦点を当てた。そのため、表面が滑らかな導電体など限られたものにしか触覚を付与することができない、という制約がある。その一方で、導電性インクによって触覚を付与する対象を印刷することができるため、紙のような薄い素材を活かしたコンテンツに対しては特に有効であるといえる。また静電吸着による触覚提示はその特性上、ユーザ自身が手を動かさなければ触覚を得ることができない。そのためゲームコントローラなど、手に把持した状態で使用するオブジェクトへの適用には不向きである。

現状のシステムは、人体の安全確保を考慮し最高出力 0.6mA、600V までの電圧を印加できる仕様となっている。しかし、高電圧での電気刺激をユーザに提示すると、痛みを伴う可能性がある。また、触

覚の感じ方の強さには個人差もあり、提示する周波数の条件によっても変化することが予想される。今後は、電気刺激および静電吸着触覚ディスプレイが周波数などの条件ごとに必要な、適切な電圧値の調査する必要がある。場合によっては、ユーザごとに最適な電圧を提示するシステムの開発も検討する。

触覚ディスプレイの破損について、評価実験から電極表面のコーティングにより使用時の破損のリスクを低減できることを示したが、現状では折り曲げや経年劣化など、他の要因による破損には対応しきれていない。そのため提案する電気刺激と静電吸着を活用した、より耐久性の高いデバイスが必要となる場合は、プリント基板やITOをなどにより実装すべきである。一方、導電性インクによる複合触覚ディスプレイ作成手法は、PC上のイラストソフトで電極パターンをデザインでき、低コスト(1枚当たり数円程度)でかつ容易に作成が可能であるというメリットがある。これはアプリケーションのプロトタイプ開発や、触覚ディスプレイの性能評価の試行錯誤のために特に有効である。そのため作成した触覚ディスプレイは、一度作ったものを使い続けることは想定していない。現状では、提案した複合触覚ディスプレイはすべて著者らがAdobe Illustratorを用いて作成している。今後はユーザ個人の手や指に合わせた形を作成したり、最適な配置の電極パターンを自動で配線する支援ソフトの開発も検討する。

また本稿では電気刺激、静電吸着による複合触覚ディスプレイの作成についての基礎検討を目的としている。この基礎検討では、導電性インクによる作成のために必要な電極パターンのデザインや実装方法を示した。今後は、提案手法を用いて周波数やDuty比、電圧など異なる条件の複合触覚を提示した際に、ユーザが実際にどのような触覚を知覚するかについての官能評価を行う。また、その結果をもとにより実用的なアプリケーションの開発をめざす。

本研究で提案した複合触覚ディスプレイは、電極だけを必要とする、特に単純な構成で実現可能なものである。また、触覚を提示する電極は小型化や集積化が容易であるというメリットもあり、指先への複合触覚提示がメインであった既存手法に比べ、掌全体など広範囲への触覚提示が可能な複合触覚ディスプレイが実現できる。本研究は、他の触覚提示手法では適用できないような、薄く小さいものに豊富な触覚を付与するための技術として貢献できると考えている。なお本研究は、ACM UIST'17にて発表を行う予定である [7]。

参考文献

- [1] Olivier Bau and Ivan Poupyrev. REVEL: Tactile Feedback Technology for Augmented Reality. In *Proc. of SIGGRAPH'12*, Vol.31, Issue 4, No. 89, (2012).
- [2] Olivier Bau, Ivan Poupyrev, Ali Israr and Chris Harrison. TeslaTouch: Electro-vibration for Touch Surfaces. In *Proc. of UIST'10*, pp.283–292, (2010).
- [3] Lynette A. Jones and Susan J. Lederman. Human Hand Function. 1st ed. USA: Oxford University Press, (2006).
- [4] Hiroyuki Kajimoto. Design of Cylindrical Whole-Hand Haptic Interface Using Electrocutaneous Display. In *Proc. of EuroHaptics'12*, pp.67–72, (2012).
- [5] Yoshihiro Kawahara, Steve Hodges, Benjamin S. Cook, Cheng Zhang and Gregory D. Abowd. Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices. In *Proc. of UbiComp'13*, pp.363–372, (2013).
- [6] Norihide Kitamura, Jurian Chim and Norihisa Miki. Electrotactile Display using Microfabricated Micro-needle Array. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.25, Number 2, (2015).
- [7] Kunihiro Kato, Homei Miyashita, Hiroyuki Kajimoto and Hiroki Ishizuka. Tactile Element with Double-sided Inkjet Printing to Generate Electrostatic Forces and Electrostimuli. In *Adjunct Proc. of UIST'17*, (2017). (印刷中)
- [8] Taku Nakamura and Akio Yamamoto. Multi-finger Electrostatic Passive Haptic Feedback on a Visual Display. In *Proc. of IEEE World Haptics'13*, pp.37–42, (2013).
- [9] Simon Olberding, Sergio Soto Ortega, Klaus Hildebrandt and Jürgen Steimle. Foldio: Digital Fabrication of Interactive and Shape-Changing Objects With Foldable Printed Electronics. In *Proc. of UIST'15*, pp.223–232, (2015).
- [10] Dongbum Pyo, Semin Ryu, Seung-Chan Kim and Dong-Soo Kwon. A New Surface Display for 3D Haptic Rendering. In *Proc. of the EuroHaptics'14*, pp.487–495, (2014).
- [11] Robert M. Strong and Donald E. Troxel. An Electrotactile Display. In *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol.11, Issue 1, pp.72–79, (1970).
- [12] Akio Yamamoto, Shunichi Nagasawa, Hiroaki Yamamoto, and Toshiro Higuchi. Electrostatic Tactile Display with Thin Film Slider and Its Application to Tactile Telepresence Systems. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.12, Issue 2, pp.168–177, (2006).
- [13] Vibol Yem and Hiroyuki Kajimoto. Wearable Tactile Device using Mechanical and Electrical Stimulation for Fingertip Interaction with Virtual World. In *Proc. of IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces*, (2017).
- [14] 梶本 裕之, 舘 暲. 経皮電気刺激における振動知覚の電極サイズ依存性. 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理, Vol.88, No.12, pp.2380–2387, (2005).