

導電性インクの両面印刷を用いた 電気刺激と静電吸着の複合触覚ディスプレイ

加藤 邦拓^{1,a)} 石塚 裕己^{2,b)} 梶本 裕之^{3,c)} 宮下 芳明^{4,d)}

受付日 2019年1月11日, 採録日 2019年7月3日

概要: 近年, リアルな触覚を再現するために, 異なる触覚提示手法を組み合わせた複合触覚ディスプレイに関する研究が検討されている. 本研究では数ある触覚提示手法のうち, 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を検討する. 提案手法では導電性インクと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. また, 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. さらに本稿では, 電気刺激と静電吸着の同時提示によって, ユーザが知覚できる触覚についての官能評価実験を実施した. 実験の結果, 複合触覚提示により特定の触覚が安定して感じられるなどの効果が確認された. また応用例として, 絵や写真など紙媒体のコンテンツに対して触覚情報を付与するアプリケーションを示した.

キーワード: 複合触覚ディスプレイ, 電気刺激, 静電摩擦, 両面印刷, 導電性インク

Double-sided Printed Hybrid Tactile Display with Electrical Stimuli and Electrostatic Forces

KUNIHIRO KATO^{1,a)} HIROKI ISHIZUKA^{2,b)} HIROYUKI KAJIMOTO^{3,c)} HOMEI MIYASHITA^{4,d)}

Received: January 11, 2019, Accepted: July 3, 2019

Abstract: Humans can perceive tactile sensation through multimodal stimuli. To demonstrate realistic pseudo tactile sensation for the users, a tactile display is needed that can provide multiple tactile stimuli. In this paper, we have explicated a novel printed tactile display that can provide both the electrical stimulus and the electrostatic force. The circuit patterns for each stimulus were fabricated by employing the technique of double-sided conductive ink printing. Requirements for the fabrication process were analyzed and the durability of the tactile display was evaluated. Users' perceptions of a single tactile stimulus and multiple tactile stimuli were also investigated. The obtained experimental results indicate that the proposed tactile display is capable of exhibiting realistic tactile sensation and can be incorporated by various applications such as tactile sensation printing of pictorial illustrations and paintings. Furthermore, the proposed hybrid tactile display can contribute to accelerated prototyping and development of new tactile devices.

Keywords: hybrid tactile display, electrical stimulus, electrostatic friction, double-sided printing, conductive ink

¹ 東京大学
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan
² 大阪大学
Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
³ 電気通信大学
The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo
182-8585, Japan
⁴ 明治大学
Meiji University, Nakano, Tokyo 164-8525, Japan

1. はじめに

人体の皮膚内部には触覚受容器と呼ばれる, 触覚を知覚

a) kkunihir@acm.org
b) ishizuka@bpe.es.osaka-u.ac.jp
c) kajimoto@kaji-lab.jp
d) homei@homei.com

するための4種類の細胞が存在している。それぞれの触覚受容器は異なる刺激に反応し、人間はその刺激の組合せによって触覚を認識している。そのため、触れた物体の触覚の再現など高度な触覚提示を行うためには、異なる刺激を提示可能な触覚ディスプレイを組み合わせて使うことが有効である [10]。近年、皮膚上に外部から複数の刺激を与えることで受容器を活性化させ、触覚を提示する「複合触覚ディスプレイ」に関する研究が提案されている。

しかし、こうした複合触覚ディスプレイには、いくつかの技術的課題が存在している。たとえば複合触覚ディスプレイの実現のためには、複数の刺激を提示するための機構を統合する必要がある、デバイスが複雑な構造となってしまう。また、触覚を提示するためのアクチュエータや振動子の形状、大きさによっては密集させることができず、指先など皮膚上の特定の部位にしか触覚を提示できない問題も生じる。

本研究ではこうした問題を解決し、複数の刺激を同時に提示可能な触覚ディスプレイの実現を目的とする。今回、単純な構成だけで実現が可能な「電気刺激」と「静電吸着」に着目し、これら2種類を組み合わせた複合触覚ディスプレイについて検討する。電気刺激および、静電吸着を用いた触覚ディスプレイはいずれも、刺激を与えるための専用のアクチュエータを必要とせず、高電圧を印加した電極のみを使用する。提案手法では導電性インクにより、電極を紙やPETフィルムといった柔軟な基板上に両面印刷することで作成する。これにより指先だけでなく、身体や実世界のオブジェクトなどの様々な形状にフィットする、触覚ディスプレイを実現した。

本稿では電気刺激と静電吸着の複合触覚ディスプレイの有効性を示すため、ユーザが実際に使用した際に感じられる触覚とその特性について調査した。実験の結果、電気刺激と静電吸着を組み合わせた複合触覚ディスプレイは単体の触覚提示に比べ、より安定した触覚提示の可能性が示唆された。なお、本稿は国内会議 [30], [31] にて口頭発表を行った内容をまとめたものである。

2. 関連研究

2.1 触覚ディスプレイ

触覚受容器に刺激を与えることで触覚を提示する様々な手法がこれまでに検討されてきた。皮膚表面に刺激を与え触覚を提示する手法として、モータによって振動を提示する手法 [3]、張力を制御する手法 [1]、空気圧によって皮膚表面に圧力を加える手法 [18]、皮膚表面の形状を直接変化させる手法 [19] などがあげられる。また、機械的なアクチュエータを使用しない手法として、収束した超音波 [8] や、プラズマ放電時に発生する熱エネルギーを用いて皮膚に接触刺激を与える手法 [20] などがある。

これに対し、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。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、電流を流し皮膚内部の触覚受容器を刺激する手法である [23]。この手法を応用し、Kajimoto は円筒上に多数の電極を形成し、手のひらの任意の箇所に電気刺激触覚を生じさせる触覚ディスプレイを提案している [11]。また Kitamura らは電極を針状にすることで、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 [13]。電気刺激では、振動子などを用いて機械的な刺激を与える手法と同様に、垂直方向の刺激を提示することができる。

Strong らは2つの導電体の間に静電気力を生じさせ、摩擦感を提示する触覚ディスプレイを開発している [22]。Bau らはこの原理を応用し、表示したコンテンツに合わせて、タッチパネルディスプレイ上に触覚を提示する TeslaTouch を提案している [5]。また Bau らは人体に電圧を印加し、GND に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 REVEL (*Reverse-Electrovibration*) を提案している [4]。TeslaTouch, および REVEL では、指先などの人体と電極との間において静電吸着を発生させ、触覚を提示していた。そのためユーザが実際に物を触っている感覚を損なうことなく、触覚を付与することができる。しかし一方で、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た [4]。

これに対し、Yamamoto らは表面に電極を有する2枚のシートを使用し、シート間で静電気力を発生させる手法を提案している [26]。また Nakamura らは Yamamoto らの手法を応用し、複数の指先に対する触覚提示を目的とした静電吸着触覚ディスプレイを開発した [15]。この触覚ディスプレイでは GND に接続された電極と、電圧を印加したパッド状の電極との間に発生する静電吸着により触覚を提示している。これらの手法は2つの電極間に生じた静電気力を用い、ユーザに対しそれらを介した触覚を提示するため、皮膚表面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。本研究で使用する複合触覚ディスプレイには、この2つの電極間で静電吸着を発生させる手法を採用している。

2.2 複数の刺激を同時に提示する複合触覚ディスプレイ

皮膚内部に存在する4種類の触覚受容器はそれぞれ異なる刺激に反応し、人間は触覚受容器が受けた複数の刺激の組合せによって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ことで有効である [10]。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。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 [27]. FinGAR は複数刺激の選択的な提示によって、人間が実際に知覚する触覚の調査を目的としている. 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 [17]. これらの振動と摩擦感を同時に提示する手法は、著者らの提案する複合触覚ディスプレイと特性的には同様のものである. 一方で、第 1 章で述べたように複合触覚ディスプレイの研究はデバイスの簡易化や、指先以外の広範囲への触覚提示も重要な要素としてあげられる. 提案する複合触覚ディスプレイは、これらの要素を満たし、かつ振動や摩擦感などの複数の触覚を提示可能なものとして位置づけられる.

このほか、Murakami らは 2 つのモータとベルトを用いた指先への圧力、せん断力、振動などの触覚提示に加え、ペルチェ素子による温度変化を組み合わせた複合触覚ディスプレイを実現している [14]. Gallo らも同様に、振動と温度変化を用いた複合触覚ディスプレイを提案している [6]. Gallo らの研究では、本研究と同様に複合触覚ディスプレイの煩雑化や密集化の問題を提起しており、それを解決するための手法として提案されている. ユーザの皮膚表面に密着させるためにフレキシブル PCB を用いた小型触覚ディスプレイを開発しており、指先や手のひら、前腕などの広範囲に触覚を提示するデバイスを実現している. 本研究で提案する電気刺激と静電吸着を用いた複合触覚ディスプレイは電極のみを必要とするため、1 つ 1 つの触覚ディスプレイの小型化が可能となった. また紙や PET など柔軟な素材を用いることで、指先や手のひらなどにフィットする多数の触覚ディスプレイを配置できる.

2.3 導電性インクに関する研究

導電性インクに関する研究として Kawahara らは電子回路やセンサを印刷により作成する手法を提案した [12]. PrintSense [7] では、印刷した回路パターンによってタッチセンサ、圧力センサ、曲げセンサなどを作成し、入力インタフェースへ応用している. Olberding らは導電性インクで印刷した回路パターン上に蛍光物質や誘電体などを重ね印刷することで、発光する紙製タッチディスプレイを提案している [16]. これらのように様々なセンサ、入力インタフェースへの応用は検討されてきたが、導電性インクを用いた触覚ディスプレイは実現されていない. 本研究では導電性インクを用いて印刷した電極によって複合触覚ディスプレイを作成し、その耐久性や提示可能な触覚の調査を行う.

3. 触覚提示手法

本章では電気刺激による振動と、静電吸着による摩擦感を組み合わせた複合触覚ディスプレイについて述べる.

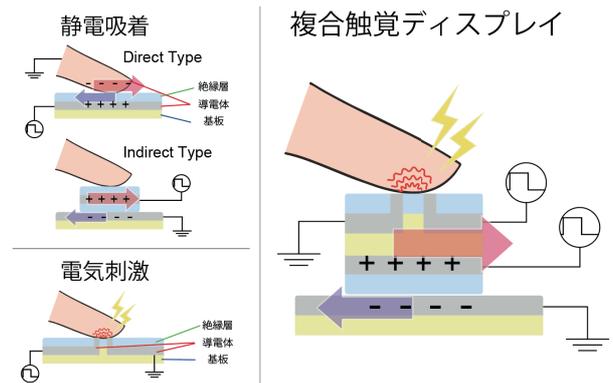


図 1 静電吸着触覚ディスプレイ (左上), 電気刺激触覚ディスプレイ (左下), 提案する複合触覚ディスプレイ (右)

Fig. 1 Electrostatic force tactile display (upper left), electrical stimulus tactile display (bottom left), and hybrid tactile display (right).

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.

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 1 つ以上の高電圧が印加される電極と、GND に接続される電極を持つ (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人間の皮膚に電流が流れ、触覚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

静電吸着は帯電した 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、電氣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、吸着力が発生する. このとき一方の導電体を固定し、もう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加し、ユーザはざらざらと引っかかるような感覚を知覚できる. 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が生じる Direct 型と、2 つの電極間に静電気力が生じる Indirect 型の 2 種類がある [15]. 図 1 左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 1 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

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 [4]. これに対し, Indirect 型では2つの電極間で静電気を生じさせるため, 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 [15].

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).

4. 実装

提案する複合触覚ディスプレイを実現するためには以下の要件を満たす必要がある.

- (1) 電気刺激のために, 導電部が露出した複数の電極を有する.
- (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つの電極を有する.

また本研究では Indirect 型の静電摩擦による触覚ディスプレイを採用している. そのため, オブジェクトに直接接触しているような触覚を保つために指とオブジェクト間の距離を極力小さくし, 触覚ディスプレイ自体が薄くなるようにデザインする必要がある. これらの要件を満たす触覚ディスプレイを容易に実現するため, 本研究では導電性インクを用いた両面印刷による作成を検討する.

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専用紙上に印刷され, 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複数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薄いテープを貼り絶縁する. これらの配線はリード線を通じて電源装置および, GNDに接続される. 図2右上の例では5つの電極のうち, 中央がGNDに接続され, その周囲の4つが電源装置に接続される. 電極パターンが印刷された面を上にし, ユーザはすべての円形パターンを1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電源装置に接続され, 電圧が印加される. ユーザは電極パターンが印刷された面を下にし, 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の上で指をスライドさせる. これによりユーザは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) によって印刷して作成される.



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)

Fig. 2 Hybrid tactile display. surface side: electrical stimulus electrode (upper right), back side: electrostatic friction electrode (bottom right).

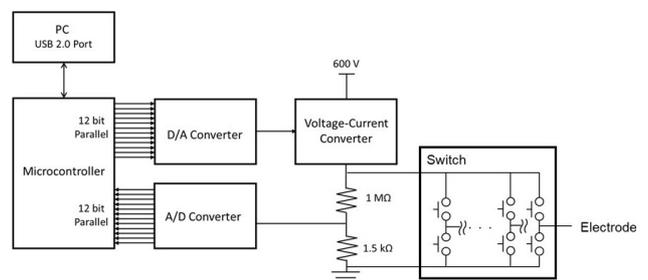


図3 電源装置の概略図

Fig. 3 Schematic illustration of voltage power supply.

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 μm の厚みを持つ導電性インク専用紙に両面印刷する. 各電極上を絶縁するための薄いテープには, 厚み 58 μm のメンディングテープ (Scotch, MP-18S) を使用する.

電源装置は電圧電流変換回路と電圧変換回路から構成される. 電源装置の回路を図3に示す. マイコン (ARM Ltd., mbed LPC 1768) から DA コンバータを通じて送られた信号が高電圧電源 (Bellnix, MHV 12-1.0K 2000P) によって駆動される電圧電流変換回路を経て定電流へと変換される. この電流値は内部の回路によって最大0.6mAに制限されている. 変換された電流は1M Ω の抵抗によって電圧へと変換される. その結果, 最大で600Vの電圧値を出力できる. 今回使用している高圧電源MHV 12-1.0K2000Pは応答性が悪く, 電圧波形を制御する用途には向かない. そのため, このような電圧電流変換回路を用いて定電流を出力し, 抵抗によって出力電圧を取り出す回路構成を用いている. またこの回路の出力部はフォトモスリレーによって構成されるスイッチング回路に接続され, 任意の数の電極に電圧を出力することも可能である. ユーザの立場からは電圧制御による刺激となるが, 電源内部で0.6mA以下の電流に制限されるため, 電極の絶縁層の不良などが起き

た場合でも安全性が確保される。この電源装置を2つ用意し、それらをPC上から同時に制御することで、電気刺激と静電吸着触覚ディスプレイにそれぞれ異なる周波数の高電圧を印加する。

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電極の間隔を決定する必要がある。電極サイズによる電気刺激触覚の知覚への影響に関する研究では、刺激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 [28]。本研究では導電性インクを用いた印刷により電極を作成しているため、作成できる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のサイズを直径 3.0mm の円形とし、電極間の距離を 1.0mm に設定した。

次に静電吸着については、印刷する電極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 [15] では Indirect 型の静電吸着触覚ディスプレイの電極を直径 30.0mm の円形に設定している。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、10.0×10.0mm の正方形とした。提示される触覚への影響を防ぐため、静電吸着用の電極上は絶縁層としてのテープの貼り付けの際、気泡の混入を防ぎ、かつ電極全体を覆うように貼り付けを行う。

4.2 電極の耐久性評価

提案する複合触覚ディスプレイは導電性インクを用い、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透明電極 (ITO) を用いる手法に比べ、遙かに耐久性が低い。たとえば、電極表面を爪で強く引っ掻く、折り目がつくまで曲げるなどによって断線を引き起こすリスクがある。断線した箇所は、導電性インクペンを用いることで多少の補修は可能であるが、提示される触覚へ影響する可能性があるため望ましくはない。そのため、提案手法を活用したアプリケーションを開発する際は、配線を極力折り曲げないデザインが必要になると考えられる。また時間経過による劣化の可能性があるため、長期間の使用にも適していない。

ここではさらに、提案手法による触覚ディスプレイに指を載せ、実際に使用するとき起こりうる電極の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は、絶縁層を形成するために電極の一部にテープを貼り付

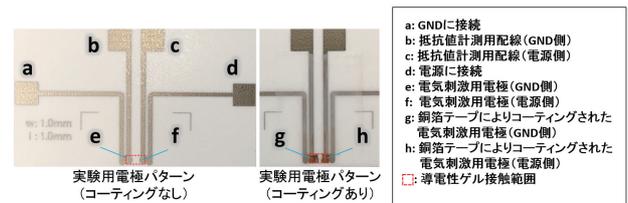


図 4 耐久性評価用電極パターン

Fig. 4 Electrode pattern for durability test.

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ため、使用中の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 2kΩ 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バイス電極 (フクダ電子株式会社, TEO-174DCR) を使用した。また導電性ゲルが接触する電極 (図 4e, f) および、電源, GND, テスタを接続する箇所 (図 4a, d) を除く配線部分はテープを用いて絶縁する。

図 4 に実験に使用する電極を示す。実験用電極パターンは直径 1.0mm 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、導電性のゲルと電極との接触状態によって、抵抗値が変化してしまうことを避けるため、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した。電極 e, f には 500 V, 100 Hz 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。

4.2.2 結果

実験の結果、電源側の電極は 0~30 分までは抵抗値が一定であり、30~40 分の間から抵抗値が上がり始め、50 分には断線していることが分かる (図 5 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。

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、実験後に電極が一部黒く変色していることが分かる (図 5 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

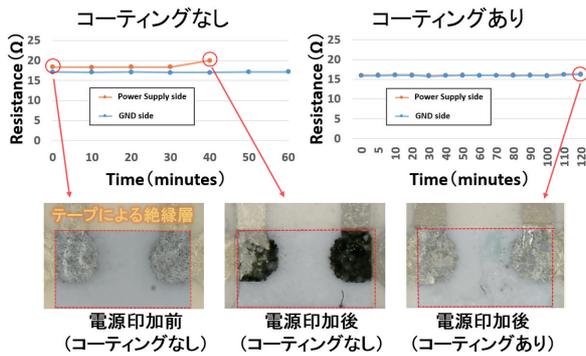


図 5 耐久性評価結果

Fig. 5 Experimental result of durability test.

し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出ていないことが分かる。そのため、この現象は高電圧の印加だけでなく、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が接触しない状態で再度実験を行った。結果は図 5 右上のようになった。グラフから、電源側および GND 側の電極で、0～50 分までの間でも抵抗変化がないことが分かる。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、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 5 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、皮膚と接触する箇所を銅箔テープなどにより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。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、同様の変色を確認された。このことから、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. 評価実験

ここでは提案した複合触覚ディスプレイがユーザに対してどのような触覚を提示できるかを評価するための実験を行う。電気刺激、および静電吸着触覚ディスプレイは周波数の異なる交流電圧を印加することで、得られる触覚が変化することが知られている。一方でそれらを組み合わせた際にどのような触覚が感じられるかは調査されていない。しかし、すべての周波数パラメータの組合せについて評価することは難しい。そこでまず、予備実験として電気刺激触覚と静電吸着触覚を個別に提示し、ユーザが弁別することのできる周波数の範囲を調査した。

図 6 に実験環境と使用した触覚ディスプレイを示す。ここでは片面の印刷用紙に、電気刺激触覚ディスプレイ、静電吸着触覚ディスプレイをそれぞれ印刷し、実験を行った。

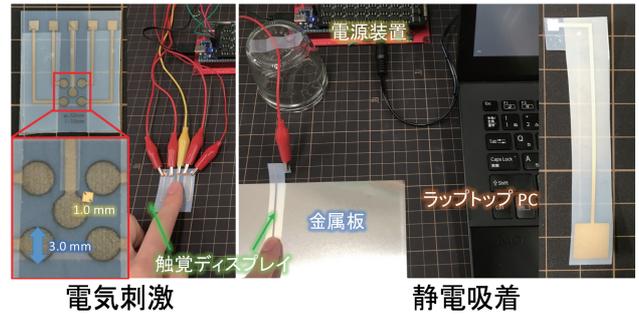


図 6 周波数変化による触覚の弁別実験環境

Fig. 6 Experimental setting of preliminary study.

電気刺激触覚ディスプレイは直径 3.0 mm の円形の電極が合計 5 つ印刷されており、中央に 1 つ、その周囲に 4 つの電極が 1.0 mm 間隔を開けて配置される。これらの電極のうち、中央に GND が接続され、残りの 4 か所に高電圧が印加される。静電吸着触覚ディスプレイは一辺が 10.0 mm の正方形が印刷され、表面を薄いテープで絶縁する。印刷した電極側に高電圧が印加され、GND に接続された金属板上に接触させて使用する。電源装置は 4 章で示したものと同様にマイコンで制御可能なものを使用する。実験参加者の皮膚上に流す電流は最大で 0.6 mA であり、条件によっては痛みをとまうことがあるが、生命に危険を及ぼすことはない。また本実験は実施先である香川大学の倫理委員会の承認 (承認番号 29-003) を得ており、すべての参加者に対し事前に実験の内容を伝え、参加の承諾を得たうえで実施した。

5.1 予備実験：周波数変化による触覚の弁別

ここでは電気刺激触覚と静電吸着触覚を個別に提示し、ユーザが弁別することのできる周波数の範囲を調査する。

5.1.1 タスク

実験参加者に対し、電気刺激触覚と静電吸着触覚について特定の周波数による刺激をサンプルとして提示し、それと同じ刺激を選択肢内から探し回答するタスクを実施した。実験はラップトップ PC 上の実験システムを用いて行われ、参加者自身が一方の手を用いて操作する。参加者は PC 操作に使用しないもう一方の手の指を触覚ディスプレイ上に置き、触覚の提示を行う。このとき、指の腹の部分が触覚ディスプレイの電極の中央に載るように指示をした。

システム上の Sample ボタン、選択肢ボタンをマウスカーソルで押している間、触覚が提示される。参加者は複数の選択肢の中から Sample と同じ触覚に感じるものを探し回答する。これを 1 試行とし、電気刺激・静電吸着の周波数は以下の条件でタスクを行う。選択肢のパラメータは、電気刺激触覚の周波数 $f_{sti} = 1, 5, 10, 20, 40, 80, 100, 160, 320, 640$ Hz の合計 10 通り、静電吸着触覚の周波数 $f_{sta} = 1, 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640$ Hz の合計 9 通りを使用した。電気刺激の印加電圧は、梶本らの研究 [29] を参考にしてい

る。信号波形は矩形波の交流電圧とし、電圧の印加時間を500 μ sに固定し、それぞれの周波数のDuty比を調整した。また静電吸着の印加電圧も同様に、信号波形は正弦波よりも触覚を知覚しやすい矩形波を採用し[25]、そのDuty比は50%とした。

電気刺激触覚の提示では、印加する電圧、電流の大きさによって痛みをとまることがある。本実験では被験者の安全を考慮し、あらかじめ電気刺激、静電吸着単体でのすべての触覚を体験してもらい、指で触れてもらえないほどの痛みをとまわらないことを確認したうえで実験を行う。電圧値は500Vを基準とし、電気刺激触覚を提示した際に痛みをとまらなく、もしくは触覚を感じない場合に電圧を100V単位で増減させ調節した。電源装置は電流制御により最大0.6mAを出力することができ、1M Ω の抵抗に接続することで600Vまでの電圧を印加することができる。

電圧値によって提示される触覚の強弱を考慮するため、電気刺激、静電吸着の電圧は同じ値とし、被験者が痛みをとまらずすべての条件で触覚を知覚できる値に設定した(静電吸着触覚:平均500V,標準偏差0V,電気刺激触覚:平均537.5V,標準偏差48.4V)。電圧値は500Vを基準とし、電気刺激触覚を提示した際に痛みをとまらなく、もしくは触覚を感じない場合に電圧を100V単位で増減させ調節した。

提示される触覚の周波数はすべてランダムな順序で提示される。実験システム上のボタンの配置や消去法により提示された周波数を推測することを防ぐため、選択肢ボタンには周波数の情報は表記せず、対応する周波数の配置順序も試行ごとにランダムに変更される。また参加者に対し、Sampleの刺激を提示後、すべての選択肢の刺激を1度以上試してから回答するように指示したうえで実験を行った。

それぞれのタスクはランダムに選出された3パラメータ分の練習を行った後に、本番を行う。電気刺激では練習3パラメータ+本番10パラメータ \times 繰返し5回=合計53回、静電吸着では練習3パラメータ+本番9パラメータ \times 繰返し5回=合計48回実施される。

電気刺激の実験では、直径3.0mmの複数の電極が印刷されたシート(三菱製紙, NB-TP-3GU100)を用意した(図6左端)。参加者はこの触覚ディスプレイ上に指を載せて使用する。静電吸着の実験では10 \times 10mmの電極パターンを持つシートを用意した(図6右端)。参加者はこの触覚ディスプレイ上に指を置き、金属板上をスライドさせるように動かして使用する。

4.2節に示したような、電極の劣化による触覚の減衰を考慮し、1試行ごとにシートの交換をする。また実験中は著者が随時電極シートの状態を監視し、変色が確認されたときにもシートの交換を行うものとする。

電気刺激の実験参加者は8名の大学生・大学院生(男性8名)であり、平均年齢23.5歳、標準偏差は1.87歳であ

表1 実験結果:電気刺激触覚の周波数変化による弁別

Table 1 Results of the recognition accuracy of electrical stimulus sensations.

		Response (Hz)									
		1	5	10	20	40	80	100	160	320	640
Presented Frequency (Hz)	1	62.5%	17.5%	7.5%	7.5%	5%	0%	0%	0%	0%	0%
	5	12.5%	50%	25%	10%	0%	0%	2.5%	0%	0%	0%
	10	10%	20%	37.5%	17.5%	7.5%	2.5%	2.5%	0%	2.5%	0%
	20	0%	5.1%	17.9%	35.9%	17.9%	12.8%	5.1%	5.1%	0%	0%
	40	0%	5%	2.5%	12.5%	27.5%	20%	17.5%	5%	5%	5%
	80	0%	0%	0%	0%	12.5%	30%	20%	22.5%	10%	5%
	100	0%	2.5%	0%	0%	7.5%	35%	20%	22.5%	12.5%	0%
	160	0%	0%	0%	0%	5%	7.5%	10%	35%	27.5%	15%
	320	0%	0%	0%	2.5%	2.5%	10%	5%	30%	27.5%	22.5%
	640	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	2.5%	17.5%	75%

表2 実験結果:静電吸着触覚の周波数変化による弁別

Table 2 Results of the recognition accuracy of electrostatic force sensations.

		Response (Hz)									
		1	5	10	20	40	80	160	320	640	
Presented Frequency (Hz)	1	62.5%	15%	5%	5%	5%	0%	2.5%	2.5%	2.5%	
	5	5%	62.5%	27.5%	2.5%	0%	0%	0%	0%	2.5%	
	10	2.5%	2.5%	72.5%	22.5%	0%	0%	0%	0%	0%	
	20	0%	2.5%	12.5%	75%	5%	2.5%	0%	0%	2.5%	
	40	2.5%	0%	0%	12.5%	65%	17.5%	0%	0%	2.5%	
	80	0%	0%	0%	0%	17.5%	55%	20%	2.5%	5%	
	160	0%	0%	2.5%	0%	7.5%	15%	67.5%	2.5%	5%	
	320	0%	0%	0%	5%	0%	0%	10%	60%	25%	
	640	0%	2.5%	0%	0%	0%	10%	7.5%	7.5%	72.5%	

る。静電吸着の実験参加者は8名の大学生・大学院生(男性8名)であり、平均年齢23.6歳、標準偏差は1.80歳である。実験参加者のうち7名は電気刺激、静電吸着の両方の実験に参加した。

5.1.2 結果と考察

表1と表2に実験結果を示す。表から電気刺激では、静電吸着に比べ識別率が低く、識別が困難であることが分かった。電気刺激について、表1の低周波領域・高周波領域に分けて着目すると1Hz, 5Hz, 10Hzの低周波領域が提示された場合、被験者は100Hz, 160Hz, 320Hz, 640Hzの高周波領域をほとんど選択していないことが分かる。逆に、高周波領域の提示に対して、低周波領域が選択されることはほとんどなかった。このことから、近い周波数での識別は困難であっても、高周波領域と低周波領域のような大まかな識別はできていることが分かる。

静電吸着について、表2から、すべてのパラメータで比較的安定して識別できていることが分かる。しかし識別率の平均は65.8%であり、高い精度とはいえない。これについては、周波数どうしの間隔を広げるようにパラメータ数を減らすことで識別率が上がると予測される。

これらの結果から、電気刺激と静電吸着との複合触覚の評価実験のために使用するためのパラメータとして、電気刺激の周波数を10Hz, 80Hz, 640Hz(高周波, 低周波とその中間)の3パターン、静電吸着触覚の周波数を5Hz, 20Hz, 80Hz, 320Hzの4パターンを採用した。

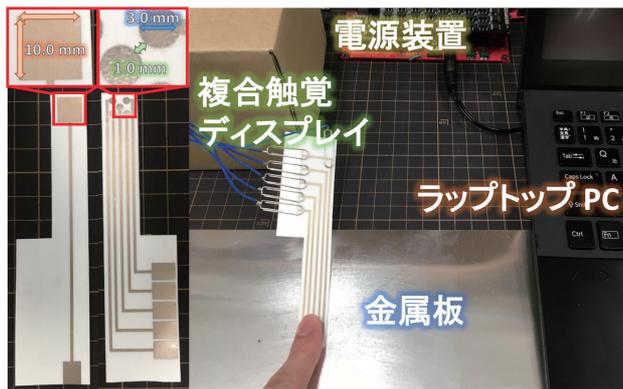


図 7 官能評価の実験環境

Fig. 7 Experimental setting of evaluation 2.

5.2 官能評価実験

ここでは電気刺激と静電吸着の複合触覚ディスプレイにより提示する触覚を、実験参加者がどのように知覚するかを評価する。

5.2.1 タスク

実験参加者に対して、異なる周波数の電気刺激と静電吸着を組み合わせた刺激を提示し、各条件について3つの項目について回答するタスクを実施した。参加者は触覚ディスプレイをGNDに接続された金属板の上で自由に動かすことができ、各条件の刺激がどのように感じたかについての質問に回答する。実験参加者は各試行の間に質問への回答を行い、回答が確定されるまで何度でも触覚を提示することとした。電気刺激と静電吸着の刺激条件はPC上の実験システムを用いて制御され、2秒間の触覚提示が2秒間隔で行われる。

各試行ではまず、実験参加者に知覚した触覚を自分自身の言葉で回答させた。次に、知覚した触覚から連想される物体を回答させた。最後に7種類の評価項目を用意し、それぞれに対し7段階のリッカートスケールでその触覚を評価させた。被験者には刺激が明瞭に感じられる場合を最大の7とし、それが無い状態を最小の1として回答するよう指示を行った。

評価項目として S_1 : 粘着質 (sticky), S_2 : 摩擦感 (frictional), S_3 : 凹凸感 (bumpy), S_4 : 触られた感覚 (touch), S_5 : 温度 (temperature), S_6 : 固さ (hardness), S_7 : 快適さ (pleasant) を用意した。これらの評価項目は、既存研究 [2], [5], [21] を参考に選定し、「水平方向に働く力に関連する感覚 (粘着質, 摩擦感)」、「垂直方向に働く力に関連する感覚 (凹凸感, 触られた感覚)」、「その他の感覚 (温度, 固さ, 快適さ)」として評価項目に加えた。

各試行について、5つの静電吸着の周波数条件 (触覚提示なし条件, 触覚提示あり条件 $f_{sta} = 5\text{ Hz}, 20\text{ Hz}, 80\text{ Hz}, 320\text{ Hz}$) と、4つの電気刺激の周波数条件 (触覚提示なし条件, 触覚提示あり条件 $f_{sti} = 10\text{ Hz}, 80\text{ Hz}, 640\text{ Hz}$) を組み合わせた周波数条件 $f_h[f_{sta}, f_{sti}]$, 合計 20 パターンを

提示する。印加電圧はそれぞれ予備実験と同様の条件を用いており、電気刺激では電圧の印加時間を $500\ \mu\text{s}$ に固定し Duty 比を調整した矩形波の交流電圧、静電吸着は Duty 比 50% の矩形波の交流電圧である。また電気刺激触覚の提示では、印加する電圧、電流の大きさによって痛みをとまることがある。本実験は被験者の安全を考慮し、あらかじめ電気刺激、静電吸着単体でのすべての触覚を体験してもらい、指で触れていられないほどの痛みをとまわないことを確認したうえで行う。電圧の値は 500 V を基準とし、痛みをとまなくもしくは触覚を感じない場合に電圧を 100 V 単位で増減させ調節した。電気刺激、静電吸着の電圧は同じ値とし、被験者が痛みをとまわずすべての条件で触覚を知覚できる値に設定した (平均 550 V , 標準偏差 50 V)。電源装置は予備実験で使用したものと同一物を使用し、 600 V の電圧を印加することができる。予備実験と同様に、実験参加者の皮膚上に流す電流は最大で 0.6 mA であり、条件によっては痛みをとまることがあるが、生命に危険を及ぼすことはない。

実験に使用するシートの表面には電気刺激用の電極が、裏面には静電吸着用電極が印刷されている。予備実験と同様に電極の劣化による影響を防ぐため、電極の状態を監視し、変色が確認された場合にシートを交換した。実験参加者は8名の大学生・大学院生 (女性2名, 男性6名) であり、平均年齢 23.0 歳, 標準偏差は 1.80 歳であった。実験参加者のうち2名は予備実験 (電気刺激, 静電吸着含む) と本実験の両方に参加した。

5.2.2 結果と考察

図 8, 図 9, 図 10, 図 11, 図 12, 図 13, 図 14 に実験結果を示す。図中、左側のヒートマップは、それぞれの感覚について得られた回答の平均点を示している。図中、右側のグラフは各周波数条件の組合せのばらつきを示している。複合刺激による各感覚の強さについて分析を行うため、刺激なしの条件を除いた実験結果に対し繰返しのある分散分析を行った。多重比較には Bonferroni の手法を用いた。その結果、感覚 S ($F_{6,42} = 9.67, p < 0.001$) および周波数の組合せ f_h ($F_{11,77} = 4.468, p < 0.001$) について主効果が見られた。また、 S と f_h との間に交互作用が見られた ($F_{66,642} = 1.865, p < 0.001$)。各感覚における、周波数の組合せについては有意差は見られなかった。以下、それぞれの感覚についての分析結果を述べる。

5.2.3 粘着質 (S_1) と摩擦感 (S_2)

図 8 および図 9 に実験結果を示す。両触覚提示なしの場合、参加者は滑らかな平面 waxy (平均 2.50 , 標準偏差 2.34)/smooth (平均 3.0 , 標準偏差 2.24) であると回答している。電気刺激触覚 f_{sti} 単体を提示した場合、 S_1, S_2 のスコアは周波数が上昇するにつれ増加している。静電吸着触覚 f_{sta} 単体を提示した場合、 S_1, S_2 のスコアは周波数が上昇するにつれ増加し、一定の周波数を越えたのちに減

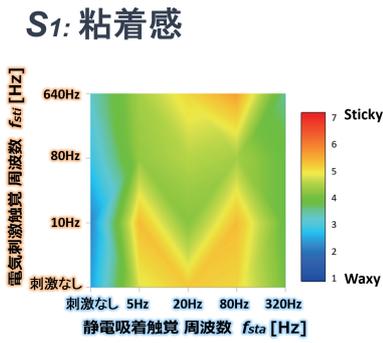


図 8 実験結果：粘着質 (S_1)
Fig. 8 Result of the sensational evaluation of S_1 .

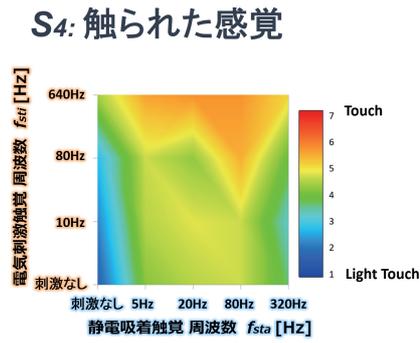


図 11 実験結果：触られた感覚 (S_4)
Fig. 11 Result of the sensational evaluation of S_4 .

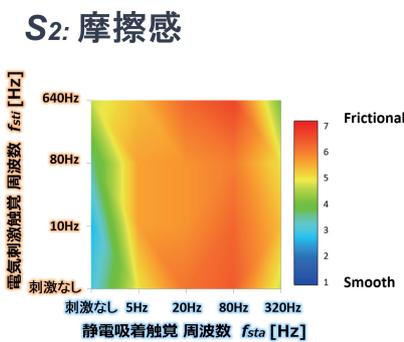


図 9 実験結果：摩擦感 (S_2)
Fig. 9 Result of the sensational evaluation of S_2 .

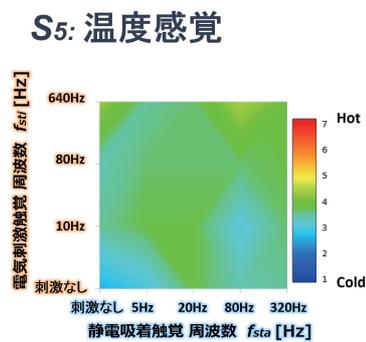


図 12 実験結果：温度感覚 (S_5)
Fig. 12 Result of the sensational evaluation of S_5 .

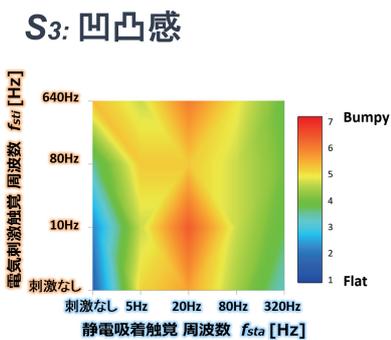


図 10 実験結果：凹凸感 (S_3)
Fig. 10 Result of the sensational evaluation of S_3 .

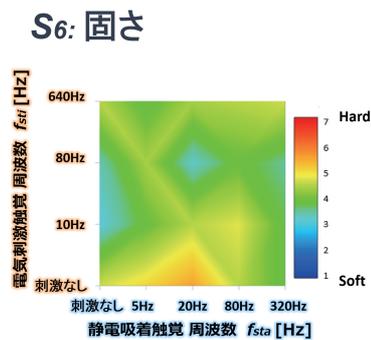


図 13 実験結果：固さ (S_6)
Fig. 13 Result of the sensational evaluation of S_6 .

少する傾向が見られた。

より詳細な分析を行うため、 f_{sti} と f_{sta} を分割し、再度繰返しのある分散分析を行った。多重比較には Bonferroni の手法を用いた。その結果、 f_{sta} ($F_{3,21} = 7.815, p < 0.001$) についても主効果が見られた。 f_{sti} については主効果は見られなかった。また S と f_{sti} との間 ($F_{12,84} = 2.079, p < 0.05$), S と f_{sta} との間 ($F_{18,126} = 2.866, p < 0.001$)

の交互作用がそれぞれ有意であった。分析の結果、 S_2 の $f_{sta} = 80$ Hz と $f_{sta} = 320$ Hz の間 ($p < 0.05$) に有意差が見られた。

文献 [5] にて述べられているように、静電吸着の高周波領域の触覚提示によって粘着感や摩擦感が減少し、滑らかな感覚になることが知られている。これは静電吸着触覚のみを提示した場合の結果でも同様のことが示されている

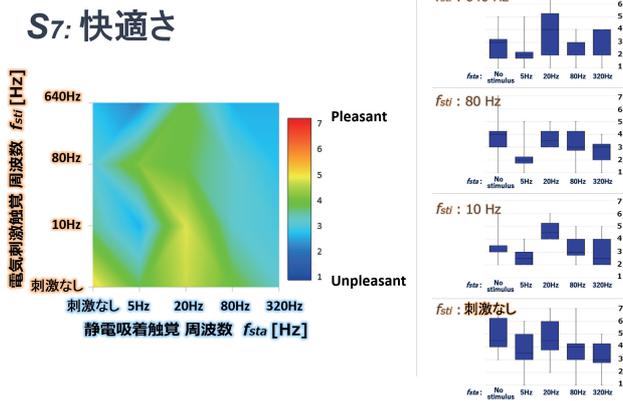


図 14 実験結果：快適さ (S_7)

Fig. 14 Result of the sensational evaluation of S_7 .

(図 8, 図 9). グラフより, 静電吸着の低い周波数領域ではこれらの平均スコアが高く, 高い周波数では平均スコアが低くなるような傾向が確認された. つまり, 今回の実験においては静電吸着を皮膚に直接与えていないものの, 既存研究である文献 [5] と同様の傾向があることが確認されたといえる.

S_2 の複合触覚領域に着目すると, $f_{sta} = 320$ Hz のとき, $f_{sti} = 10$ Hz, 80 Hz を提示した場合, 比較的にスコアが高くなっていることが読み取れる. このときスコアのばらつきに注目すると, S_2 の特定箇所でのみ, 極端に小さくなっていることが分かった ($f_h[80$ Hz, 10 Hz], $f_h[80$ Hz, 80 Hz], $f_h[20$ Hz, 640 Hz]). このことから, 摩擦感 S_2 は特定の周波数条件の静電吸着と電気刺激を同時に与えることでより安定した触覚を提示できる可能性が示唆された.

5.2.4 凹凸感 (S_3) と触られた感覚 (S_4)

図 10 および図 11 に実験結果を示す. グラフから両触覚提示なしの場合, 参加者は平坦な, 触られていない感覚 flat (平均 1.75, 標準偏差 1.98)/light touch (平均 1.75, 標準偏差 0.97) であると回答していることが分かる. 電気刺激触覚 f_{sti} 単体を提示した場合, S_3, S_4 のスコアは周波数が上昇するにつれ増加している. 静電吸着触覚 f_{sta} 単体を提示した場合, S_3, S_4 のスコアは周波数が上昇するにつれ増加し, 一定の周波数を超えたのちに減少する傾向が見られた. 分析の結果, S_3 の静電吸着触覚提示あり条件 $f_{sta} = 20$ Hz と $f_{sta} = 320$ Hz の間, S_4 の $f_{sta} = 80$ Hz と $f_{sta} = 320$ Hz の間にそれぞれ有意差が見られた (それぞれ最低でも $p < 0.05$).

S_3 の複合触覚領域に着目すると, 低周波数領域の静電吸着と, 高周波数領域の電気刺激との組合せによりスコアが増加していることが分かる. 図 10 から, 特に $f_{sta} = 20$ Hz の静電吸着触覚を提示することで比較的ばらつきも小さく, 高いスコアが得られていることが分かる.

5.2.5 温度感覚 (S_5), 固さ (S_6), 快適さ (S_7)

図 12, 図 13 および, 図 14 に実験結果を示す. 図 12,

図 13 から S_5 および S_6 のスコアは, 静電吸着触覚, 電気刺激触覚, 複合触覚の提示にかかわらず, 全体的にスコア 3~5 に集中していることが分かる. この結果は, 両触覚提示なしの状態と比較しても大きな差はなく, 実際に触れているシートやその下の導電体の温度に依存していると考えられる. S_7 では分析の結果, 静電吸着の $f_{sta} = 5$ Hz と $f_{sta} = 20$ Hz 間, $f_{sta} = 20$ Hz と $f_{sta} = 80$ Hz 間, $f_{sta} = 20$ Hz と $f_{sta} = 320$ Hz 間に有意差が見られた (最低でも $p < 0.05$). 図 14 から, f_{sti} の周波数が高くなるにつれ, スコアが減少していた. これは, 電気刺激の周波数が高くなると高速で皮膚が刺激されるため, 皮膚に痛みが生じることが原因であると考えられる. 実験では参加者の安全を配慮し, 事前に被験者に対して電気刺激および, 静電吸着のすべての触覚を提示し, 痛みがともなわないことを確認したうえで行った. しかし, 周波数の高い電気刺激はユーザに不快感を与える要因になりうることが考えられる.

5.2.6 ユーザが知覚した感覚

実験参加者のうち, 何名かは $f_{sti} = 10$ Hz の電気刺激触覚のみが提示されたとき, および $f_{sta} = 320$ Hz の静電吸着触覚のみが提示されたときに「金属の板や紙のような滑らかな表面」であると回答した. 本実験では, 紙製の触覚ディスプレイを用い, 金属板上を動かすというタスクを行わせた. 低周波数の電気刺激触覚のみを提示した場合, および高周波数の静電吸着触覚のみを提示した場合は感じられる触覚が弱くなることから, ユーザが実際に触れている紙・金属板といった触覚提示なしの状態とあまり変わらない回答が得られたと考えられる. また, これらの回答は電気刺激触覚 f_{sti} が増加するにつれて, 粗い感覚に変化していく傾向が確認された. これもグラフ, および実験データの分析結果と一致しており, 高い周波数領域の静電吸着に対して電気刺激が組み合わされた場合「滑らかな表面である」という回答から「粗い表面である」という回答に変化していった. 実験参加者の数名は, これらを「粗い紙や石の表面の感触」と回答している.

回答の結果から, 電気刺激と静電吸着の組合せによって得られる特有の触覚は確認できず, それぞれ単体の刺激を提示した場合と同様の触覚であることが分かった.

5.2.7 実験のまとめと議論

S_1, S_2 では, 電気刺激の有無にかかわらず, 低周波領域の静電吸着触覚を提示した場合に知覚できることが分かる (図 8, 図 9). また高周波領域になるにつれ触覚が弱まっていくことが分かる. 特に摩擦感 S_2 は, 特定の周波数の電気刺激触覚と静電吸着触覚を同時に提示することで, 単体の触覚を提示をした場合に比べ, 安定した触覚を提示できる可能性がある.

凹凸感 S_3 は低周波領域の静電吸着触覚, または高周波領域の電気刺激触覚を提示した際に得られる. またこの触覚は S_1, S_2 が強く感じられる領域 ($f_{sta} = 320$ Hz 以外の

領域)においても感じることができ、これらは組み合わせた触覚を提示することができると考えられる。

温度感覚 S_5 、固さの感覚 S_6 は電気刺激と静電吸着の両方を組み合わせても影響は見られず、複合触覚ディスプレイを介して触れるオブジェクトの性質に依存すると考えられる。今回の実験では複合触覚ディスプレイを介して触れるオブジェクトとして表面の滑らかな金属板を使用した。一方で提案手法は、導電性インクによる印刷によって触れるオブジェクト自体の作成も可能である。そのため柔軟な素材の上に、印刷した電極シートを貼り付ければ、柔らかい触覚と、摩擦感や粘着質などの感覚を同時に提示することも可能だと考えられる。

本実験は手順は文献 [5] を参考に行っている。今回、触覚ディスプレイの評価手法として、触覚の官能評価に一般的に用いられるリッカートスケールを採用した。しかしリッカートスケールでの評価は、被験者が感じる刺激の強さは被験者の内的な評価に依存するため、実験結果のばらつきが大きくなるという結果となった。こうした傾向は、文献 [5] においても見られ、妥当性のある結果であると考えられる。一方で、複合触覚の提示により、多くの被験者が触覚を明瞭に感じる箇所においてばらつきが小さくなり、安定した触覚が提示できていることが示された。今後は電圧値の比率による触覚の違いや、周波数の Duty 比による触覚への影響についても調査を行い、提案手法の有用性についてより詳細に検証を行う必要があると考えている。

また今回の実験で得られた結果は、静電吸着触覚と電気刺激触覚の提示のための電圧を同じ値に設定したものである。その結果、電気刺激より静電吸着の方が強い影響力を持ち、電気刺激が知覚されにくくなるということが見られた。静電吸着の電圧を下げ、得られる触覚を弱めることで電気刺激によって得られる触覚を強く知覚させれば、異なる性質の触覚提示も可能となると考えられる。

6. アプリケーション例

6.1 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グローブデバイスを試作した(図 15 a)。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容易にプロトタイプングすることができる。またこのグローブを用いた触覚変化に加え、AR によってオブジェクトの見た目を変化させることで、表面の滑らかなオブジェクトに対し視覚的・触覚的なテクスチャを付与するアプリケーションを実装した(図 15 b)。ユーザは表面の滑らかなアルミ製のキューブに触れながら、木材のようなザラザラとした触覚を感じることができる。周波数は官能評価時に被験者から得られた回答を元に $f_{sta} = 80 \text{ Hz}$ 、 $f_{sti} = 640 \text{ Hz}$ を使用した。このアプリケーション例では

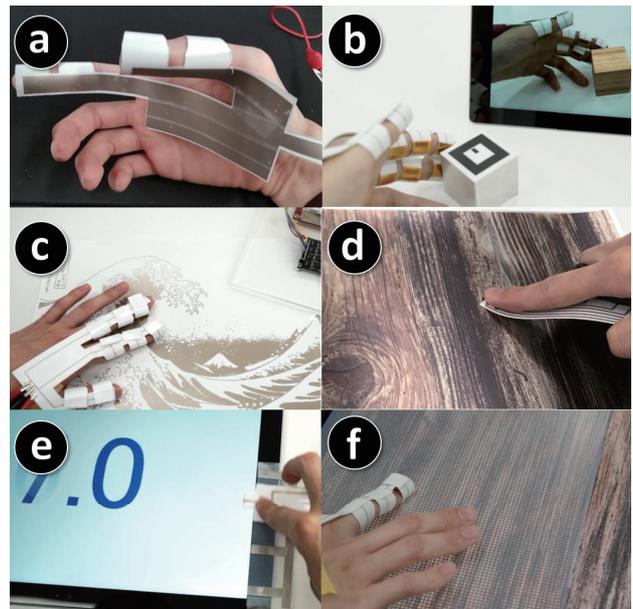


図 15 アプリケーション例。(a) グローブ型触覚ディスプレイ、(b) AR アプリケーション、(c) イラストへの触覚付与、(d) 写真への触覚付与、(e) スライドインタフェースへの応用、(f) ディスプレイへの応用

Fig. 15 Application example. (a) glove-type tactile display, (b) AR application, (c) adding tactile feedback to picture, (d) adding tactile feedback to photograph, (e) slider-type interface, (f) applied for tabletop display.

ユーザの手の位置計測は行っておらず、一定の電圧波形を用いて触覚を提示した。

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のうえ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し、ユーザはコンテンツを視覚的だけでなく、触覚情報とあわせて楽しむことができる。図 15 c 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。このアプリケーション例も同様にユーザの手の位置検出は行っておらず、一定の電圧波形を用いて触覚を提示した。図 15 d は印刷した写真に対して触覚を付与した例である。導電性インクによって全体を塗りつぶした用紙上に、通常のカラーインクによって木材や和紙などのテクスチャを印刷した。周波数は官能評価の際に、被験者から得られた回答を元にそれぞれ $f_{sta} = 80 \text{ Hz}$ 、 $f_{sti} = 640 \text{ Hz}$ および、 $f_{sta} = 320 \text{ Hz}$ 、 $f_{sti} = 640 \text{ Hz}$ を使用した。この例では触覚ディスプレイ裏側に設置したマウスによって位置を計測し、触覚ディスプレイの移動によって強弱を変化させることで触覚を表現した。

提案手法では、触覚が付与されるオブジェクト自体も印刷によって作成することができる。そのため本手法は雑誌や絵本、広告など様々な紙媒体のコンテンツへの適用が期待できる。

画像に合わせた触覚提示を実現する場合、触覚ディスプレイの位置計測を行うことが必要となる。現状の実装では、触覚ディスプレイ裏側に設置した小型マウスによって取得した相対的な位置座標の変化によって提示する触覚の強弱のみを変化させている。このほか、深度センサを用いた位置計測や、写真の輝度情報をセンサで読み取るなどの手法によっても実現が可能である。

現状ではまだ至っていないが、今後は木材や石などの実物体から表面のテクスチャをサンプリングし、周波数や電圧値などのパラメータに反映させることでリアルな触覚の再現が可能であると考えられる。また今後は、前述した位置計測手段によってユーザの手や指先の位置によって異なるパラメータ条件の触覚を提示するアプリケーションの実装を目指す。

6.2 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。たとえば任意の形に切り取る、曲面に沿って貼り付けるといった使い方が考えられる。図15eは、スライド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パネルディスプレイ上でタッチ入力が発生させるための電極パターンを持つ。ユーザがスライダを移動させることで、導電性パターンを通して画面端をスクロールし、スライダの位置計測を行っている。また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。ユーザはスライダインタフェースをこの楕形電極シート上でスライドさせて使用する。この際、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。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。このように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実装した。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け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15fは、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付けることで簡易的なTeslaTouch[5]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。

7. 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しか触覚を付与することができない、という制約がある。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だといえる。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0.6 mA、600 V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、痛みをとまなう可能性がある。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。そのためより耐久性の高いデバイスが必要となる場合は、フレキシブル基板やITOなどを用いて実装すべきである。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枚あたり数円程度)でかつ容易に作成が可能である。既存研究において触覚ディスプレイ用の電極を作成する場合、基板加工[11]やMEMS技術[9],[24]を用いられることが多い。これに対し、提案手法を用いることで制作時間・費用が格段に下がるため、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に有効である。そのため本稿で提案した両面印刷による触覚ディスプレイは、1度作ったものを使い続けることは想定していない。また現状では、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状の触覚ディスプレイの作成や、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。今回、アプリケーションや実験用の電極の作成の際には、絶縁層の形成のために市販のテープを用いた。触覚提示の再現性のため、静電吸着用の電極のみ気泡の混入を防ぎ、かつ電極全体を覆うように貼り付ける必要がある。それ以外の配線部分については、特に貼り付ける際に精度は求められない。一方で電気刺激用の電極サイズによっては、テープを小さく切り貼り付ける必要があるため多少の手間となる場合がある。この問題については、修正テープを用いることで、気泡の混入を防ぎつつ、効率的に絶縁層の形成が可能になる。

2章でも述べたとおり、これまでに単一の刺激を用いた

触覚ディスプレイは数多く検討されてきたが、それらを組み合わせた複合触覚ディスプレイに関する研究は少ない。一方で、近年ではVRの急速な普及にともない、視覚的情報以外の感覚の再現が求められている。こうした触覚ディスプレイの実現のためには、人間の触覚メカニズムを考慮したデバイス設計を行う必要がある。本研究で提案した複合触覚ディスプレイは電極だけを使用とするという、単純な構成で実現可能である。また電極の小型化や密集化が容易であるというメリットもあり、手のひら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。そのため、他の触覚提示手法では適用できないような、薄く小さいものに多様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。

8. まとめ

本研究では導電性インクの両面印刷を用いた電気刺激と静電吸着の複合触覚ディスプレイを提案した。導電性インクの両面印刷により、2種類の触覚ディスプレイを薄く柔軟な紙の基板上に実装することで、ユーザの身体にフィットする様々な触覚ディスプレイを実現した。また評価実験では2つの刺激を組み合わせた複合触覚によって知覚される触覚を調査した。実験の結果、特定の触覚が安定して感じられるなどの相互作用が確認され、提案した触覚ディスプレイが、単体の触覚提示手法を用いた場合に比べ、より安定した触覚を提示できる可能性が示唆された。

謝辞 本研究はJST, COIの支援を受けたものである。また本研究はJSPS科研費18H05010, 17K12727, 16J10193の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Aoki, T., Mitake, H., Keoki, D., Hasegawa, S. and Sato, M.: Wearable Haptic Device to Present Contact Sensation Based on Cutaneous Sensation Using Thin Wire, *Proc. ACE'09*, pp.115–122 (2009).
- [2] Ara, J., Hwang, S.H., Song, T. and Khang, G.: Effects of the Stimulus Parameters on the Tactile Sensations Elicited by Single-Channel Transcutaneous Electrical Stimulation, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.15, No.2, pp.305–313 (2014).
- [3] Asano, S., Okamoto, S., Matsuura, Y., Nagano, H. and Yamada, H.: Toward Quality Texture Display: Vibrotactile Stimuli to Modify Material Roughness Sensations, *Journal of Advanced Robotics*, Vol.28, No.16, pp.1079–1089 (2014).
- [4] Bau, O. and Poupyrev, I.: REVEL: Tactile Feedback Technology for Augmented Reality, *Proc. SIGGRAPH'12*, Vol.31, No.4, pp.89:1–89:11 (2012).
- [5] Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A. and Harrison, C.: TeslaTouch: Electro-vibration for Touch Surfaces, *Proc. UIST'10*, pp.283–292 (2010).
- [6] Gallo, S., Son, C., Lee, H.J., Bleuler, H. and Cho, I.J.: A Flexible Multimodal Tactile Display for Delivering Shape and Material Information, *Journal of Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.263, pp.180–189 (2015).
- [7] Gong, N.W., Steimle, J., Olberding, S., Hodges, S., Gillian, N., Kawahara, Y. and Paradiso, J.A.: PrintSense: A Versatile Sensing Technique to Support Multimodal Flexible Surface Interaction, *Proc. CHI'14*, pp.1407–1410 (2014).
- [8] Hoshi, T., Takahashi, M., Iwamoto, T. and Shinoda, H.: Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound, *IEEE Trans. Haptics*, Vol.3, No.3, pp.155–165 (2010).
- [9] Ishizuka, H., Komurasaki, S., Kato, K. and Kajimoto, H.: Evaluation of Electro-vibration Stimulation with a Narrow Electrode, *Micromachines*, Vol.9, 483 (2018).
- [10] Jones, L.A. and Lederman, S.J.: Human Hand Function, 1st ed., Oxford University Press (2006).
- [11] Kajimoto, H.: Design of Cylindrical Whole-Hand Haptic Interface Using Electrocutaneous Display, *Proc. EuroHaptics'12*, pp.67–72 (2012).
- [12] Kawahara, Y., Hodges, S., Cook, B.S., Zhang, C. and Abowd, G.D.: Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices, *Proc. UbiComp'13*, pp.363–372 (2013).
- [13] Kitamura, N., Chim, J. and Miki, N.: Electrotactile Display Using Microfabricated Micro-needle Array, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.25, No.2 (2015).
- [14] Murakami, T., Person, T., Fernando, C.L. and Minamizawa, K.: Altered Touch: Miniature Haptic Display with Force, Thermal and Tactile Feedback for Augmented Haptics, *Proc. SIGGRAPH'17 Emerging Technologies*, Article No.2 (2017).
- [15] Nakamura, T. and Yamamoto, A.: Multi-finger Electrostatic Passive Haptic Feedback on a Visual Display, *Proc. WHC'13*, pp.37–42 (2013).
- [16] Olberding, S., Wessely, M. and Steimle, J.: PrintScreen: Fabricating Highly Customizable Thin-film Touch-displays, *Proc. UIST'14*, pp.281–290 (2014).
- [17] Pyo, D., Ryu, S., Kim, S.C. and Kwon, D.S.: A New Surface Display for 3D Haptic Rendering, *Proc. EuroHaptics'14*, pp.487–495 (2014).
- [18] Russomanno, A., Gillespie, R.B., O'Modhrain, S. and Barber, J.: Modeling Pneumatic Actuators for a Refreshable Tactile Display, *Proc. EuroHaptics'14*, pp.385–393 (2014).
- [19] Schorr, S.B. and Okamura, A.M.: Fingertip Tactile Devices for Virtual Object Manipulation and Exploration, *Proc. CHI'17*, pp.3115–3119 (2017).
- [20] Spelmezan, D., Sahoo, D.R. and Subramanian, S.: Sparkle: Hover Feedback with Touchable Electric Arcs, *Proc. CHI'17*, pp.3705–3717 (2017).
- [21] Steenbergen, P., Buitenweg, J.R., Trojan, J., Heide, E.M., Heuvel, T., Flor, H. and Veltink, P.H.: A System for Inducing Concurrent Tactile and Nociceptive Sensations at the Same Site Using Electrocutaneous Stimulation, *Journal of Behavior Research Methods*, Vol.44, No.4, pp.924–933 (2012).
- [22] Strong, R.M. and Troxel, D.E.: An Electrotactile Display, *IEEE Trans. Man-Machine Systems*, Vol.11, No.1, pp.72–79 (1970).
- [23] Szeto, A.Y.J., Lyman, J. and Prior, R.E.: Electrocutaneous Pulse Rate and Pulse Width Psychometric Functions for Sensory Communications, *Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol.21, No.2, pp.241–249 (1979).
- [24] Tang, H. and Bee, D.J.: A Microfabricated Electro-

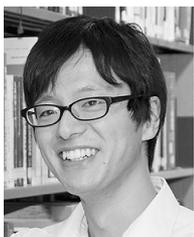
static Haptic Display for Person with Visual Impairments, *IEEE Trans. Rehabilitation Engineering*, Vol.6, No.3, pp.241–248 (2006).

- [25] Vardar, Y., Guclu, B. and Basdogan, C.: Effect of Waveform on Tactile Perception by Electro-vibration Displayed on Touch Screens, *IEEE Trans. Haptics*, Vol.9, No.4, pp.488–499 (2017).
- [26] Yamamoto, A., Nagasawa, S., Yamamoto, H. and Higuchi, T.: Electrostatic Tactile Display with Thin Film Slider and Its Application to Tactile Telepresence Systems, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.12, No.2, pp.168–177 (2006).
- [27] Yem, V. and Kajimoto, H.: Wearable Tactile Device using Mechanical and Electrical Stimulation for Fingertip Interaction with Virtual World, *Proc. IEEE VR'17*, pp.99–104 (2017).
- [28] 梶本裕之, 館 暉: 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).
- [29] 梶本裕之, 川上直樹, 館 暉: 神経選択刺激のための最適設計法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-D-II, No.9, pp.1484–1493 (2002).
- [30] 加藤邦拓, 石塚裕己, 梶本裕之, 宮下芳明: 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, 第25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論文集 (WISS'17), pp.53–58 (2017).
- [31] 加藤邦拓, 石塚裕己, 梶本裕之, 宮下芳明: 電気刺激と静電吸着を組み合わせた複合触覚ディスプレイの官能評価, インタラクション 2018 論文集, pp.15–24 (2018).



加藤 邦拓 (正会員)

2013年明治大学理工学部情報科学科卒業。2015年明治大学大学院理工学研究科新領域創造専攻デジタルコンテンツ系博士前期課程修了。2015年同大学理工学部助手。2016年日本学術振興会特別研究員 (DC2)。2018年明治大学大学院先端数理科学研究科先端メディアサイエンス専攻博士後期課程を修了し、博士号 (工学) を取得。2018年より東京大学大学院工学系研究科特任研究員に就任、現在に至る。ACM 会員。



石塚 裕己

明治大学理工学部機械情報工学科卒業。同大学院理工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻で博士号 (工学) 取得。2016年度香川大学工学部助教。2019年度より大阪大学大学院基礎工学研究科助教。日本機械学会、計測自動制御学会、VR 学会各会員。



梶本 裕之

1998年3月東京大学工学部計数工学科卒業。2001年4月日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2003年3月同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程退学、博士 (情報理工学)。2003年4月東京大学助手。2006年9月電気通信大学助教授。2007年4月同准教授。2018年4月同教授。触覚ディスプレイ、触覚センサ、バーチャルリアリティシステム等の研究開発に従事。日本バーチャルリアリティ学会、日本ロボット学会、計測自動制御学会各会員。



宮下 芳明 (正会員)

千葉大学工学部卒業 (画像工学)、富山大学大学院で音楽教育を専攻、北陸先端科学技術大学院大学にて博士号 (知識科学) 取得、優秀修了者賞、2007年度明治大学理工学部に着任。2009年度准教授。2013年同大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科所属。2014年より教授、現在に至る。日本ソフトウェア科学会、VR 学会、ヒューマンインターフェース学会、ACM 各会員。