

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

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

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感を知覚しており、よりリアルな触感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有効である。著者らはこれまでに、電気刺激触覚と静電吸着触覚に着目し、それらを組み合わせ提示可能な複合触覚ディスプレイとその作成手法を提案してきた。これにより電気刺激による垂直方向の振動と静電吸着による水平方向の摩擦を組み合わせ提示できる。本研究の目的は、電気刺激触覚と静電吸着触覚の同時提示によって、実際にユーザが知覚することのできる触覚についての官能評価実験を実施し、提案した複合触覚ディスプレイの使用による特性を調査することである。実験の結果、電気刺激と静電刺激を組み合わせることによりリアルな触感が提示できる可能性が示唆された。また、提案した複合触覚ディスプレイの応用例として、絵や写真など紙媒体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。

User Study of the Hybrid Tactile Display with Electrical Stimuli and Electrostatic Forces

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

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. We have explicated a novel printed tactile display that can provide both the electrical stimulus and the electrostatic force. We also described the fabrication technique using double-sided conductive ink printing. In this paper, we investigate how human feel tactile sensations to describe the characteristic of proposed hybrid tactile display. 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.

1. はじめに

人体の皮膚内部には 4 種類の受容器と呼ばれる触覚を知覚するための細胞が存在している。それぞれの受容器は異なる刺激に反応し、その刺激の組み合わせによって人間は触覚を認識している [11]。そのため、物体に触れた際の触感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複数の触覚ディスプレイを組み合わせることが有効である。

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、よりリアルな触覚を提示するための複合

¹ 明治大学
Meiji University, Nakano, Tokyo, Japan
² 日本学術振興会
JSPS, Chiyoda, Tokyo, Japan
³ 香川大学
Kagawa University, Takamatsu, Kagawa, Japan
⁴ 電気通信大学
The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo, Japan
a) kkunihir@meiji.ac.jp
b) hi1124@eng.kagawa-u.ac.jp
c) kajimoto@kaji-lab.jp
d) homei@homei.com

触覚ディスプレイに関する研究が提案されている。こうした触覚ディスプレイの発展のためには、いくつかの解決すべき技術的課題が存在している。例えば、複合触覚ディスプレイを実現するためには、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ため、デバイスが複雑な構造になってしまう。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や大きさによっては、集積化することができず指先など皮膚上の特定の部位のみにしか触覚を提示できないといった問題が生じる。

1.1 電気刺激と静電吸着を用いた複合触覚ディスプレイ

こうした問題を解決する手法として、著者らは「電気刺激触覚ディスプレイ」と「静電吸着触覚ディスプレイ」に着目した。またそれらを組み合わせた複合触覚ディスプレイを提案し、その作成手法を報告してきた [8], [31]。

電気刺激触覚は、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受容器を刺激し、触覚を提示する手法である。この触覚ディスプレイは、電圧を印加する電極と、GND に接続される電極を有する (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につながる神経が直接刺激される。これによりユーザには皮膚が垂直方向に振動しているような触感が提示される。

静電吸着触覚ディスプレイは 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。この触覚ディスプレイは電圧を印加する電極と、その電極を介してユーザが触れる対象である GND 接続された電極を有する (図 1 上)。これらの電極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、それぞれの電極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、一方の電極を固定し、もう一方の電極を水平方向に動かすと電極間に作用する摩擦力が増大し、ざらざらと引っかかるような摩擦感が提示される。また、この静電吸着を断続的に生じさせることで振動も提示できる。

本研究で使用する複合触覚ディスプレイは文献 [31] にて提案した、導電性インクを用いた両面印刷によって作成する。図 1 右下に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。

電気刺激、及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、電圧を印加した電極のみを使用する。また、提案した複合触覚ディスプレイは導電性インクとインクジェットプリンタを用いた両面印刷によって作成できる。紙や PET のような薄く柔軟性に優れた素材を使用できるため、ユーザ個人の身体にフィットした形状の触覚ディスプレイ

が実現可能となった。また、刺激のために電源のみを必要とすることから、デバイスの構造を単純化できるという特徴もある。これにより従来では困難であった薄く小さいものに対しても触感の付与が可能になった。

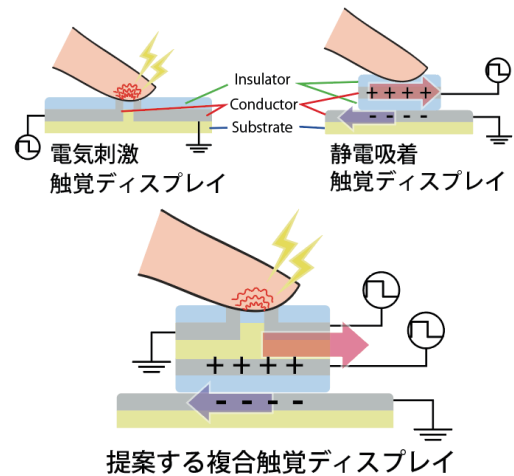


図 1 静電吸着触覚ディスプレイ (上), 電気刺激触覚ディスプレイ (左下), 電気刺激と静電吸着を組み合わせた複合触覚ディスプレイ (右下)。

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

1.2 本研究の目的

著者らの提案した電気刺激触覚と静電吸着触覚を組み合わせた複合型の触覚ディスプレイによって、ユーザの皮膚に対し垂直方向と水平方向の刺激を組み合わせた触覚提示を実現した [8]。また、導電性インクとインクジェットプリンタによる印刷によって触覚ディスプレイを作成する手法を検討し、その耐久性について評価を行ってきた [31]。しかし、こうした印刷によって作成した低コストな触覚ディスプレイを用いて電気刺激触覚と静電吸着触覚を同時に提示した際、ユーザが実際にどのような触感を知覚するかについての調査はこれまで行われてこなかった。

本研究の目的は、提案した複合触覚ディスプレイをユーザに使用させ、実際に感じられる触覚とその特性を調査することである。また、その調査結果をもとにアプリケーションを開発し、提案した複合触覚ディスプレイの有用性について議論する。本論文では、2 種類の官能評価実験を行い、触覚の調査を行った。実験結果から提案した複合触覚ディスプレイを用いることで、電気刺激触覚、静電吸着触覚それぞれの単体での使用に比べ、よりはっきりとした、リアルな触感提示の可能性が示唆された。

2. 関連研究

2.1 触覚ディスプレイ

人間の皮膚内部に存在する受容器に対して刺激を与えることで、触感を提示する「触覚ディスプレイ」に関する研究がこれまでに様々な手法が検討されてきた。皮膚表面に刺激を与え触感を提示する手法として、モータなどによって振動を提示する手法 [3], [4], [14], 張力を制御する手法 [1], 空気圧アクチュエータによって皮膚表面に圧力を加える手法 [19], [21], 皮膚表面の形状を直接変化させる手法 [7], [20], [29] などが挙げられる。また、機械的なアクチュエータなどを使用しない手法として、収束した超音波 [10], [15] 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 [23] などがある。

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 [24]。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 [6]。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 [5]。TeslaTouch, REVEL の手法では、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皮膚に振動刺激を与える手法であった。この手法の特徴としては、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た [5]。

これに対し、Yamamoto らは内部に電極を有する 2 枚のシートに電圧を印加し、シート間で静電気力を発生させる手法を提案している [27]。また Nakamura らは複数の指先に対する触感提示を目的とした、静電吸着による触覚ディスプレイを開発している [17]。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摩擦力を提示する手法を提案している。これらの手法では 2 つの電極間で静電気力を生じさせ、ユーザに対しそれらを介した触覚を提示するため、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。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。

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刺激する方法である [25]。この手法を応用し、Kajimoto は円筒上に多数の電極を形成し、掌の任意の箇所へ電気刺

激を生じさせる触覚ディスプレイを提案している [12]。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 [13]。電気刺激触覚では、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。

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 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「実物体の触感再現」のような、より高度な触感提示のためには、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が有効である [11]。人間の皮膚に複数の刺激を与えることで触感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 [28]。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感として知覚するかを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 [18]。水平方向の触覚である摩擦感と、垂直方向の触覚である振動を同時に提示するこれらの手法は、著者らの提案した複合触覚ディスプレイと触覚の特性的には、同様のものがある。その一方で 1.1 節で述べたように、複合触覚ディスプレイの研究はデバイスの簡易化や、指先以外の皮膚の広範囲への触覚提示も重要な要素のひとつとして挙げられる。静電吸着触覚と電気刺激触覚を組み合わせた複合触覚は、これらの要素を満たし、かつ水平方向の触覚である摩擦感と、垂直方向の触覚である振動を提示可能な触覚ディスプレイとして位置づけられる。

この他、Murakami らは、2 つのモータとベルトによる指先への圧力、せん断力、振動などの触感提示に加え、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 [16]。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 [9]。Gallo らの研究は、本研究と同様に複合触覚ディスプレイの煩雑化や集積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している。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刺激を提示するデバイスを実現している。本研究で使用した電気刺激と静電気力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、小さなひとつひと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。

3. 評価実験

3.1 実験 1: 周波数変化による触覚の弁別

ここでは、提案した複合触覚ディスプレイが実際にユーザに対してどのような触感を提示することができるかを評価するための実験を行う。電気刺激、及び静電吸着触覚ディスプレイでは周波数の異なる交流電圧を印加すると、得られる触覚も変化することは知られているが、それらを組み合わせた際にどのような触感が感じられるかは調査されていない。しかし、全ての周波数パラメータの組み合わせについて評価することは難しい。そこで、まず静電吸着触覚と電気刺激触覚をそれぞれ個別に提示し、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。そして、その組み合わせに対し、官能評価を実施した。

実験に使用す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) を用い、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。

3.1.1 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乗るように指示をした。

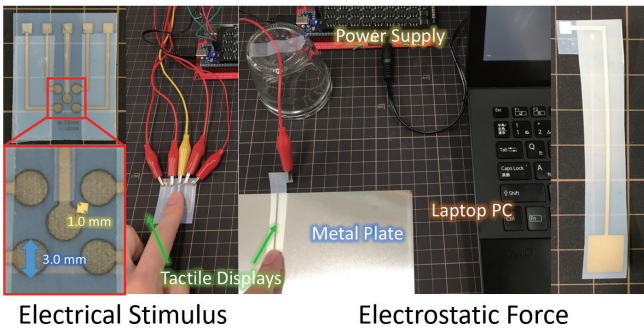


図 2 周波数変化による触覚の弁別実験環境。

Fig. 2 Experimental setting of evaluation 1.

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、刺激が提示される。参加者は、複数の選択肢の中から Sample と同じ刺激に感じるものを探し

回答する。これを 1 試行とし、静電・電気刺激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。電気刺激触覚の印加電圧は梶本らの研究 [30] 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 500 μs とした。静電吸着触覚の印加電圧は、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 [26], その Duty 比は 50 % とした。また電気刺激の提示では、印加する電圧、電流の大きさによって痛みを伴うことがある。本実験では被験者の安全を考慮し、予め電気刺激、静電吸着単体での全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伴わないことを確認したうえで実験を行う。電圧の値は 500 V (電流 0.5 mA) を基準とし、痛みを伴うもしくは触覚を感じない場合に電圧を 100 V (電流 0.1 mA) 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、被験者が痛みを伴わず全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 500 V, 標準偏差 0 V, 電気刺激触覚: 平均 537.5 V, 標準偏差 48.4 V)。

実験に使用する周波数条件の中からそれぞれの刺激について 1 つの Sample の刺激が選択される。これらの周波数は全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示せず、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、サンプル刺激を提示後、全ての選択肢の刺激をいちど以上試してから回答するように指示した上で実験を行った。

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、本番が行われる。電気刺激では練習 3 パラメータ + 本番 10 パラメータ \times 繰り返し 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 繰り返し 5 回 = 合計 48 回実施される。図 2 に実験のセットアップと実験に使用した電極シートを示す。

参加者はこのシート上に指を置き、金属版上をスライドさせるように動かす。電気刺激触覚の実験では、直径 3.0 mm の複数の電極が印刷されたシート (Mitsubishi Paper Mill, NB-TP-3GU100) を用意した (図 2 左端)。静電吸着の実験では 10 \times 10 mm の電極パターンを持つシートを用意した (図 2 右端)。

印刷された電極の内、中央が GND に接続され、周囲の 4 箇所が電源に接続される。中央の電極と周囲の電極との距離は 1.0 mm に設定した。また、文献 [31] にて報告されているような、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した。なお、実験中にも随時電極シートの状態を監視し、変色が確認された時にもシート

の交換行うものとする。

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。

3.1.2 結果と考察

表 1 と 2 に実験結果を示す。表から電気刺激では, 静電吸着に比べ精度が低く, 識別が困難であることがわかった。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 1 Hz, 5 Hz, 10Hz の低周波領域が提示された場合, 被験者は 100 Hz, 160 Hz, 320 Hz, 640Hz の高周波領域を殆ど選択していないことがわかる。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殆どなかった。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わかる。

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.

Presented Frequency (Hz)	Response (Hz)									
	1	5	10	20	40	80	100	160	320	640
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 %

静電吸着について, 表 2 から, 全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わかる。しかし, 正答率の平均は 65.8 %であり高い精度とは言えない。これについては, 周波数同士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, 電気刺激触覚の周波数を 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。

3.2 実験 2: 官能評価

ここでは, 電気刺激と静電吸着とを複合した触覚ディスプレイが提示する触感を被験者がどのように知覚するかを評価する実験について説明する。なお, 本実験は Bau らの報告に基づいている [6]。

3.2.1 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 つの事項について回答するタスクを実施した。参加者は触覚ディ

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.

Presented Frequency (Hz)	Response (Hz)									
	1	5	10	20	40	80	160	320	640	
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 %	

スプレイを GND 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に回答を行い, 回答が確定されるまで何度でも試すことができることとした。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 秒間の刺激提示が 2 秒間隔で行われる。

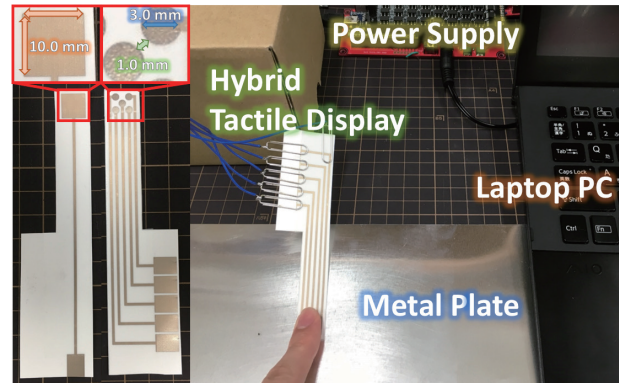


図 3 官能評価の実験環境。

Fig. 3 Experimental setting of evaluation 2.

各試行ではまず, 実験参加者は知覚した触感を自分自身の言葉で回答させた。次に, 知覚した触感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 段階のリッカースケールでその触感を評価させた。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, 既存研究において扱われたものを参考に選定した [2], [6], [22]。これらは静電吸着触覚の特徴とされている「水平方向に働く力に関連する感覚 (粘着質, 摩擦感)」、電気刺激触覚の特徴とされている「垂直方向に働く力に関連する感覚 (凹凸感, 触られた感覚)」を基準としており, さらにその他の感覚 (温度, 固さ, 快適さ) を評価項目として加えた。

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 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。電気刺激触覚の印加電圧は実験 1 と同様に、梶本らの研究 [30] 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 $500 \mu\text{s}$ とした。静電吸着触覚の印加電圧は矩形波を採用し [26], その Duty 比は 50 % とした。また電気刺激の提示では、印加する電圧、電流の大きさによって痛みを伴うことがある。本実験では被験者の安全を考慮し、予め電気刺激、静電吸着単体での全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伴わないことを確認したうえで実験を行う。電圧の値は 500 V (電流 0.5 mA) を基準とし、痛みを伴うもしくは触覚を感じない場合に電圧を 100 V (電流 0.1 mA) 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、被験者が痛みを伴わず全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)。

実験に使用するシートの表面には電気刺激触覚用の電極が、背面には静電吸着触覚用の電極が印刷されている。実験 1 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。

3.2.2 結果と考察

実験結果を繰り返しのある分散分析によって分析した。多重比較には Bonferroni の手法を用いた。その結果、周波数の組み合わせ f_h について主効果が見られた ($F_{19,133} = 7.97, p < 0.001$)。また、 S と f_h との間に交互作用が見られた ($F_{144,798} = 2.70$)。 S と周波数条件のペアの内、 S_1 の時に電気刺激触覚提示 $f_{sti} = 10 \text{ Hz}$ と複合触覚提示 $f_h/[5 \text{ Hz}, 10 \text{ Hz}]$ との間、電気刺激触覚提示 $f_{sti} = 10 \text{ Hz}$ と複合触覚提示 $f_h/[5 \text{ Hz}, 80 \text{ Hz}]$ との間に有意差が見られた。

3.2.3 粘着質 (S_1) と摩擦感 (S_2)

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大している。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大し、一定の周波数を超えたのちに減少する傾向が見られた。

より詳細な分析を行うため、 f_{sti} と f_{sta} を分割し、再度繰り返しのある分散分析によって分析した。多重比較には Bonferroni の手法を用いた。その結果、 f_{sti} ($F_{3,21} = 3.50, p < 0.05$) と f_{sta} ($F_{4,28} = 20.9, p < 0.001$) のそれぞれについても主効果が見られた。

また S と f_{sti} との間 ($F_{18,126} = 4.16, p < 0.001$)、 S と f_{sta} との間 ($F_{24,168} = 4.45, p < 0.001$)、 f_{sti} と f_{sta} との間 ($F_{12,84} = 2.11, p < 0.05$) の交互作用がそれぞれ有意で

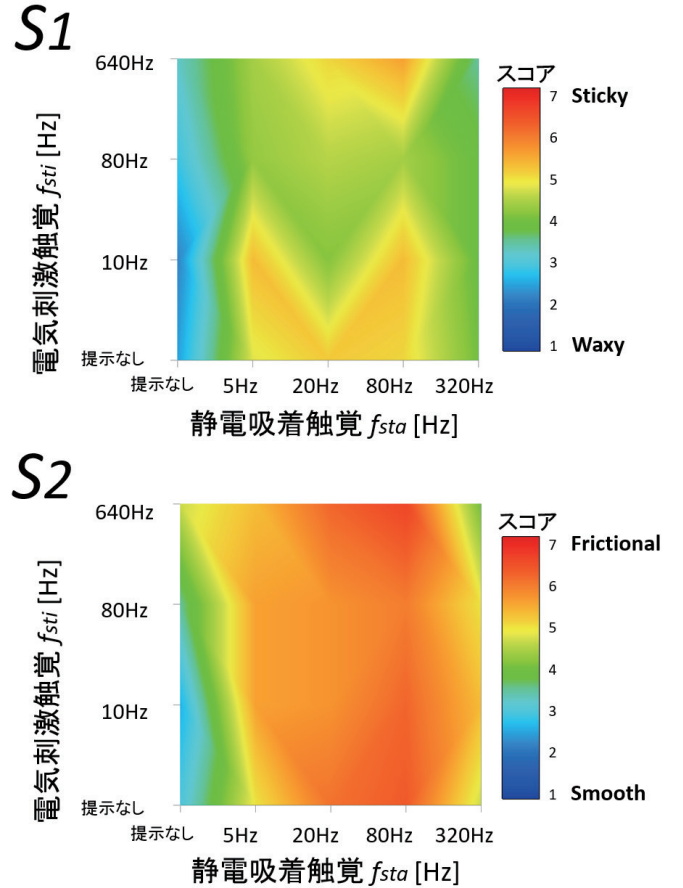


図 4 実験結果: 粘着質 (S_1) と摩擦感 (S_2)

Fig. 4 Result of the sensational evaluation of S_1 and S_2 .

あった。分析の結果、 S_1 の静電吸着触覚提示なし条件と静電吸着触覚提示あり条件 $f_{sta} = 5 \text{ Hz}, 20 \text{ Hz}, 80 \text{ Hz}$ の間 (全ての f_{sta} のペアについて最低でも $p < 0.05$)、 S_2 の静電吸着触覚提示なし条件と静電吸着触覚提示あり条件 $f_{sta} = 5 \text{ Hz}, 20 \text{ Hz}, 80 \text{ Hz}$ の間、静電吸着触覚提示あり条件 $f_{sta} = 80 \text{ Hz}$ と $f_{sta} = 320 \text{ Hz}$ の間 (全ての f_{sta} のペアについて最低でも $p < 0.05$) に有意差が見られた。文献 [6] にて述べられているように、静電吸着触覚の高周波領域の触覚提示によって、粘着質や摩擦感が減少し、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 4)。そのため S_1 と S_2 について、静電触覚提示なしの条件と静電触覚提示ありの条件 $f_{sta} = 5 \text{ Hz}, 20 \text{ Hz}, 80 \text{ Hz}$ との間で有意差が見られた ($f_{sta} = 320 \text{ Hz}$ 間でのみ有意差なし) 結果は既存研究である文献 [6] と同様の傾向があるといえる。

ここで S_1, S_2 の複合触覚領域に着目してみると、このことから、同じ電圧値の印加によって複合触覚を提示した場合、 f_{sti} のみを提示した場合には、周波数が上がるにつれスコアが上がる傾向にあるに関わらず、高周波領域の f_{sta} が組み合わさることでスコアが減少している。静電吸着の方が電気刺激よりも強い影響力を持つことがわかる。しかし複合触覚領域について、 $f_{sta} = 320 \text{ Hz}$ の条件に着

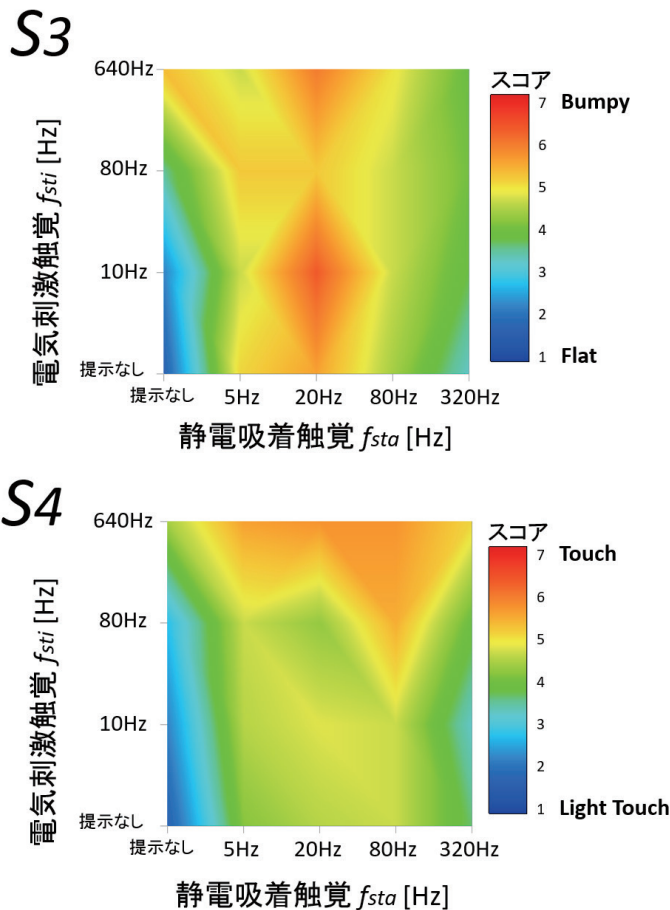


図 5 実験結果: 凹凸感 (S_3) と 触られた感覚 (S_4)

Fig. 5 Result of the sensational evaluation of S_3 and S_4 .

目してみると、 $f_{sti} = 10$ Hz, 80 Hz を提示した場合に比較的にスコアが高くなっていることが読み取れる。更に、スコアの分散について着目すると、 S_2 の特定箇所でのみ分散が極端に小さくなっていることがわかった ($f_h[80$ Hz, 10 Hz], $f_h[80$ Hz, 80 Hz], $f_h[20$ Hz, 640 Hz], (それぞれ最小-最大値の幅 0.25))。このことから、静電と電気刺激の組み合わせは、特定の周波数を与えることで、よりはっきりとした、もしくリアルな感覚を作り出せる可能性が示唆された。

3.2.4 凹凸感 (S_3) と 触られた感覚 (S_4)

図 5 に示すように、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。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大している。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大し、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 の静電吸着提示あり条件 $f_{sta} = 20$ Hz と $f_{sta} = 320$ Hz の間、 S_4 の静電吸着提示なし条件と、提示あり条件 $f_{sta} = 5$ Hz, 20 Hz, 80 Hz の間、電気刺激提

示あり条件 $f_{sti} = 10$ Hz と $f_{sti} = 640$ Hz の間、 $f_{sti} = 80$ Hz と $f_{sti} = 640$ Hz の間にそれぞれ有意差が見られた (最低でも $p < 0.05$)。

また S_4 についての分析結果 (静電吸着提示なし条件との比較は $f_{sta} = 320$ Hz 間でのみ有意差なし) は既存研究である文献 [6] と同様の傾向が示された。これは S_1 , S_2 においても同様の傾向が見られていた。しかし S_4 はこれと同時に f_{sti} の低周波領域と高周波領域との間 ($f_{sti} = 10$ Hz と $f_{sti} = 640$ Hz の間、 $f_{sti} = 80$ Hz と $f_{sti} = 640$ Hz の間) でも有意差が見られていた。図 5 から、 f_{sti} の高周波領域を提示することで、複合触覚提示領域においてもスコアが減少していないことが読み取れる。この傾向は S_1 , S_2 では見られなかったことから、 S_4 はこれらとは異なる性質を持つといえる。これらのことから、 S_4 は特に静電吸着の影響を受けず、電気刺激の提示によって安定して得られる感覚であるといえる。

3.2.5 温度感覚 (S_5), 固さ (S_6), 快適さ (S_7)

図 6 から S_5 及び S_6 のスコアは、静電吸着触覚、電気刺激触覚、複合触覚の提示に関わらず、全体的にスコア 3~5 に集中していることがわかる。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、電気刺激提示なしの条件と、電気刺激提示ありの条件 $f_{sti} = 640$ Hz との間に有意差が見られた ($p < 0.05$)。図 6 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ることがわかる。これは、電気刺激触覚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、及び静電吸着の全ての触覚を提示し、痛みが伴わないことを確認した上で行った。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のひとつとなりうる事が考えられる。

3.2.6 ユーザが知覚した感覚

実験参加者の内、何名かは $f_{sti} = 10$ Hz の電気刺激のみが提示された時、及び $f_{sta} = 320$ Hz の静電吸着のみが提示された時に「金属の板や紙のような滑らかな表面」である回答した。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。このことから、低周波数の電気刺激触覚のみ、または高周波数の静電吸着触覚のみを提示した場合は、触覚提示なしの状態とあまり変わらない触感が提示されていたと考えられる。また、これらの回答は 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。これはグラフ、及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触覚に対して電気刺激触覚が組み合わせられた場合、「滑らかな表面である」という回答から「粗い表面である」

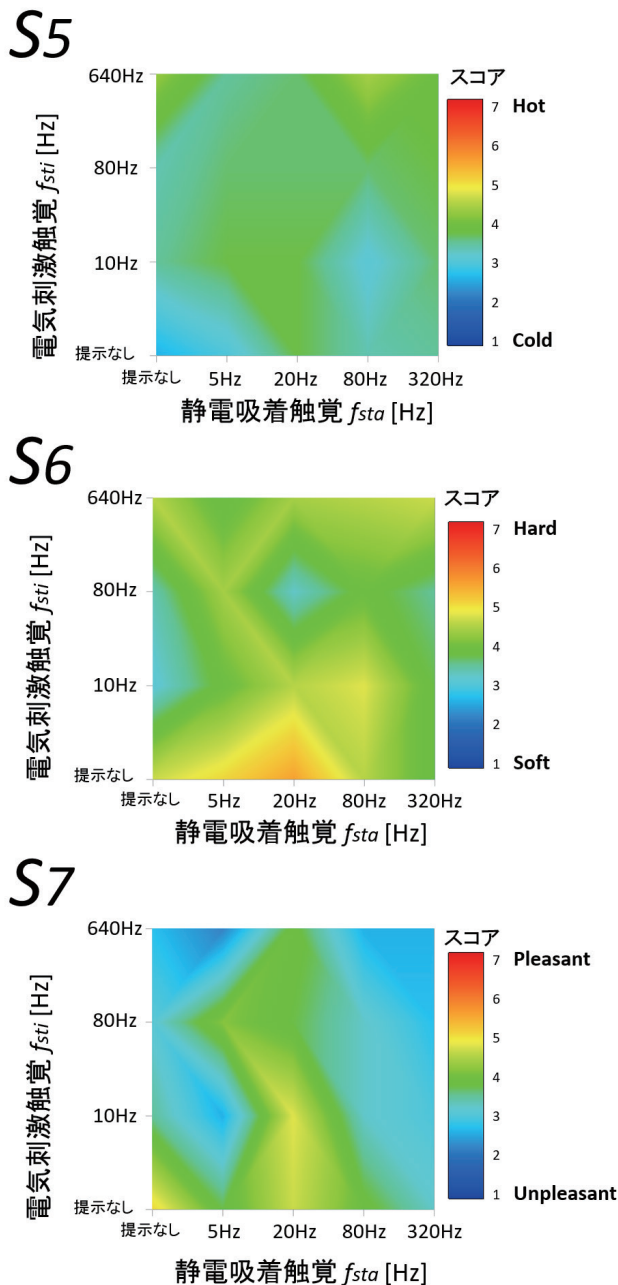


図 6 実験結果: 温度感覚 (S_5), 固さ (S_6), 快適さ (S_7)

Fig. 6 Result of the sensational evaluation of S_5 , S_6 and S_7 .

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触感」と回答している。これらの回答は電気刺激のみの場合の回答と同様の傾向を示している。

3.2.7 実験のまとめと議論

まず S_1 , S_2 については、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。また高周波領域になるにつれ感覚が弱まっていく。このことから、低周波領域の静電吸着を提示することで粘着質や摩擦感といった水平方向にかかる力は比較的安定して提示できることがわかる。特に摩擦感 S_2 は、特定の周波数の電気刺激と静電吸着を同時に提示することで、単体の刺激

提示をした場合に比べ、はっきりとした、よりリアルな感覚を作り出せる可能性がある。

凹凸感 S_3 は低周波領域の静電吸着、または高周波領域の電気刺激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、それらを組み合わせた触覚を提示することができる。一方、電気刺激単体であれば凹凸感が感じられるが、高周波領域の静電吸着が提示された場合には弱まってしまうことがわかった。これらのことから、摩擦感や粘着質といった表面の質感と、凹凸感を同時に提示する場合は、静電吸着を 320 Hz 以下に設定する必要があると考えられる。また、触られた感覚 S_4 は静電吸着の有無にかかわらず、電気刺激によって安定した提示が可能である。

温度感覚 S_5 , 固さの感覚 S_6 は両方の刺激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。今回、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金属板を使用した。しかし、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では、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、柔らかな素材の上に印刷した電極シートを張り付ければ、柔らかい触感と、摩擦感や粘着質などの質感、凹凸感などの感覚を同時に提示することも可能となることが考えられる。

今回の実験で得られた結果は、静電吸着と電気刺激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感覚を強く知覚させることができ、異なる性質の刺激を提示することも可能であると考えられる。今後は、電圧値の比率による触覚の違いや、周波数の Duty 比による触感への影響を評価する必要がある。

4. 応用例

図 7 は印刷した写真に対して触覚を付与する応用例である。導電性インクによって全体を塗りつぶした用紙上に、通常のカラークインクによって木材や和紙などのテクスチャをカラー印刷した写真を作成した。電源装置とマイコンを PC 接続し、システム上から特定の周波数の電気刺激、静電吸着触覚を提示する。周波数の値は、実験の結果をもとに決定している。これにより、ユーザは写真やイラストなどのコンテンツを視覚的だけでなく、触覚情報と併せて楽しむことができる。

ユーザに触覚を提示する触覚ディスプレイだけでなく、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できる。そのため、雑誌や絵本、広告など様々な紙媒体のコ

ンテ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周波数を変化させている。この他、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実現が可能であると考えている。



図 7 アプリケーション例。

Fig. 7 Application example.

5. まとめ

本研究では電気刺激触覚と静電吸着触覚を同時に提示する複合触覚ディスプレイの官能評価実験を行った。実験ではまず電気刺激触覚と静電気力触覚単体を提示した際に、ユーザが弁別可能な周波数の範囲を調査した。その後、実験結果から得られた周波数パラメータを用い、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感を調査した。実験結果から被験者が回答した触感に関して、電気刺激・静電吸着触覚単体を提示した場合と比べ、大きな変化は見られなかった。しかし複合触覚提示を行うことで、よりリアルな触感が提示できる可能性が示唆された。提案された触覚ディスプレイは導電体に接触することで触感提示することから、従来では困難であった薄く小さいものに対してでも導電性がある場合には触感付与が可能になる。また、実験結果をもとに写真に対して触覚を付与するアプリケーションを開発した。

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. In *Proc. of 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, Issue 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, Issue.16, pp.1079–1089, (2014).
- [4] Asano,S., Okamoto,S., and Yamada,Y. Vibrotactile Stimulation to Increase and Decrease Texture Roughness. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Vol.45, Issue 3, pp.393–398, (2015).
- [5] Bau,O., and Poupyrev,I. REVEL: Tactile Feedback Technology for Augmented Reality. In *Proc. of SIGGRAPH'12*, Vol.31, Issue 4, No.89, (2012).
- [6] Bau,O., Poupyrev,I., Israr,A., and Harrison,C. Tesla-Touch: Electro-vibration for Touch Surfaces. In *Proc. of UIST'10*, pp.283–292, (2010).
- [7] Benko,H., Holz,C., Sinclair,M., and Ofek,E. Normal-Touch and TextureTouch: High-fidelity 3D Haptic Shape Rendering on Handheld Virtual Reality Controllers. In *Proc. of UIST'16*, pp.717–728, (2016).
- [8] Kato,K., Miyashita,H., Kajimoto,H., and Ishizuka,H. Tactile Element with Double-sided Inkjet Printing to Generate Electrostatic Forces and Electrostimuli. In *Adjunct Proc. of UIST'17*, pp.31–33, (2017).
- [9] 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).
- [10] Hoshi,T., Takahashi,M., Iwamoto,T., and Shinoda,H. Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol.3, Issue 3, pp.155–165, (2010).
- [11] Jones,L.A., and Lederman,S.J. Human Hand Function. 1st ed. USA: Oxford University Press, (2006).
- [12] Kajimoto,H. Design of Cylindrical Whole-Hand Haptic Interface Using Electrocutaneous Display. In *Proc. of EuroHaptics'12*, pp.67–72, (2012).
- [13] Kitamura,N., Chim,J., and Miki,N. Electrotactile Display Using Microfabricated Micro-needle Array. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.25, Number 2, (2015).
- [14] Lee,J.C., Dietz,P.H., Leigh,D., Yerazunis,W.S., and Hudson,S.E. Haptic Pen: A Tactile Feedback Stylus for Touch Screens. In *Proc. of UIST'04*, pp.291–294, (2004).
- [15] Makino,Y., Furuyama,Y., Inoue,S., and Shinoda,H. HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback. In *Proc. of CHI'16*, pp.1980–1990, (2016).
- [16] Murakami,T., Person,T., Fernando,C.L., and Minamizawa,K. Altered Touch: Miniature Haptic Display with Force, Thermal and Tactile Feedback for Augmented Haptics. In *Proc. of SIGGRAPH'17 Emerging Technologies*, Article No.2, (2017).
- [17] Nakamura,T., and Yamamoto,A. Multi-finger Electrostatic Passive Haptic Feedback on a Visual Display. In *Proc. of WHC'13*, pp.37–42, (2013).
- [18] Pyo,D., Ryu,S., Kim,S.C., and Kwon,D.S. A New Surface Display for 3D Haptic Rendering. In *Proc. of EuroHaptics'14*, pp.487–495, (2014).
- [19] Russomanno,A., Gillespie,R.B., O'Modhrain,S., and Barber,J. Modeling Pneumatic Actuators for a Refreshable Tactile Display. In *Proc. of EuroHaptics'14*, pp.385–393, (2014).
- [20] Schorr,S.B., and Okamura,A.M. Fingertip Tactile Devices for Virtual Object Manipulation and Exploration. In *Proc. of CHI'17*, pp.3115–3119, (2017).

- [21] Stanley,A.A., Gwilliam,J.C., and Okamura,A.M. Haptic jamming: A Deformable Geometry, Variable Stiffness Tactile Display Using Pneumatics and Particle Jamming. In *Proc. of WHC'13*, pp.25–30, (2013).
- [22] 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, Issue 4, pp.924–933, (2012).
- [23] Spelmezan,D., Sahoo,D.R., and Subramanian,S. Sparkle: Hover Feedback with Touchable Electric Arcs. In *Proc. of CHI'17*, pp.3705–3717, (2017).
- [24] Strong,R.M., and Troxel,D.E. An Electrotactile Display. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol.11, Issue 1, pp.72–79, (1970).
- [25] 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, Issue 2, pp.241–249, (1979).
- [26] Vardar,Y., Guclu,B., and Basdogan,C. Effect of Waveform on Tactile Perception by Electro vibration Displayed on Touch Screens. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 9, Issue 4, pp.488-499, (2017).
- [27] Yamamoto,A., Nagasawa,S., Yamamoto,H., and Higuchi,T. Electrostatic Tactile Display with Thin Film Slider and Its Application to Tactile Telepresentation Systems. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.12, Issue 2, pp.168–177, (2006).
- [28] Yem,V., and Kajimoto,H. Wearable Tactile Device using Mechanical and Electrical Stimulation for Fingertip Interaction with Virtual World. In *Proc. of IEEE VR'17*, pp.99–104, (2017).
- [29] Wang,Q., and Hayward,V. Compact, Portable, Modular, High-performance, Distributed Tactile Transducer Device Based on Lateral Skin Deformation. In *Proc. of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp.67–72, (2006).
- [30] 梶本 裕之, 川上 直樹, 舘 暲. 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).
- [31] 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).