

指型 GelForce と電気触覚ディスプレイを用いた 分布触覚情報伝達システム

佐藤 克成^{*1} 舘 暲^{*2}

Transmission System of Spatially Distributed Tactile Information using Finger-shaped GelForce and Electrotactile Display

Katsunari Sato^{*1} and Susumu Tachi^{*2}

Abstract - Spatially distributed tactile information is essential for dexterous operation in telexistence. In this study, we propose a transmission system of spatially distributed tactile information using a finger-shaped GelForce and an electrotactile display that we have developed. Because the finger-shaped GelForce consists of elastic body, it can mimic the deformation of human finger on measuring information. The electrotactile display is suitable for presenting tactile information to user's fingers, because it does not need any actuators to present tactile information. We improved the softness of the finger-shaped GelForce and realized a one-fingered transmission system of the proposed method. We evaluated a spatial resolution of the constructed system from three discrimination experiments. From the result, we estimated the current limit to improve the spatial resolution of the proposed system. Furthermore, we confirmed that the proposed system can be efficient for the multi-fingered telexistence system.

Keywords: finger-shaped sensor, electrotactile display, spatially distributed tactile information, and telexistence

1. はじめに

テレグジスタンス技術[1]は、ロボットシステムを介することで、遠隔地の物体との臨場感あるインタラクションを可能にする技術である。極地作業や遠隔手術、遠隔コミュニケーションなど、様々な分野への応用が期待されている。テレグジスタンスにおいて、ヒトが直接物体に触れるような円滑なインタラクションを実現するためには、触覚情報の伝達が必要である。特に、物体を把持し操作するためには、触覚の空間的な分布情報が重要となる。指表面における接触圧の位置や広がりやを認識することで、接触物体の移動や姿勢、形状[2]などを認識できる。そして、物体の持ち替えやなぞり[3][4]、把持力増加といった把持方法の調整が可能となる。

分布触覚情報の伝達は、ロボット（スレーブ）ハンド側でその情報を計測するセンサと、マスタハンド側でヒトに対して提示するディスプレイから実現される（図1）。ここで、テレグジスタンスにおける器用な把持操作を実現するためには、満たすべき条件が3つあると考える。第1に、センサとしてはヒトの指に類似した物理特性を持つことが必要となる。ヒトが直接物体に触れた場合と同等の状況を再現するためには、触覚情報の計測は接触に伴うヒト指や物体の変形を再現しつつ行わなければならない[5]。そのため、センサはヒト指の曲率やヤング率

などを模擬する必要がある。第2に、ディスプレイとしては、小型軽量の提示機構を有する必要がある。把持操作においては、分布触覚情報を複数の指に対して独立にフィードバックしなければならない。このとき、分布情報の提示機構が大型であると、多指に対する分布触覚情報提示の実装が困難となる。第3に、センサとディスプレイを統合した伝達システムとしては、ヒト指と同等の空間解像度や時間解像度を実現する必要がある。伝達システムに要求される解像度は把持操作の種類によって異なると考えられる。本研究では、多様な把持操作への応用を考慮して、ヒト指の解像度の実現を目標とする。

これまで、様々な触覚情報の伝達システムが開発されているが、以上の条件を満たすシステムは実現されていない。Kontarinis ら[6]のシステムでは、把持した物体の硬さや指と物体との滑り状態を伝達することで、安定した把持を可能とする。また、山内ら[7]のシステムでは、

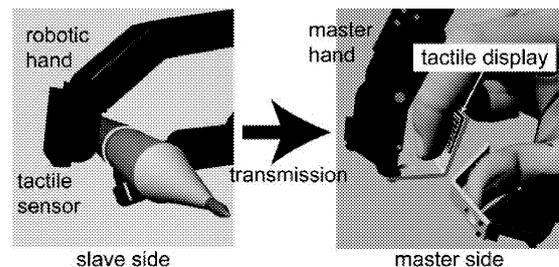


図1 テレグジスタンスのための分布触覚情報の伝達システム

Fig.1 Transmission system of spatially distributed tactile information for Telexistence.

*1: 東京大学大学院情報理工学系研究科

*2: 慶應大学大学院メディアデザイン研究科

*1: Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo.

*2: Graduate School of Media Design, Keio University.

物体のテクスチャ情報を伝達している。これらのシステムは、指と物体との接触を1点と仮定したものであり、触覚の空間的分布情報の伝達は行っていない。一方で、Methilら[8]は、遠隔触診のための分布触覚情報伝達システムを構築している。しかし、このシステムの目的は触診における「しこり」の発見であるため、触覚センサはヒト指の物理特性を模擬したものではなく、また各指を独立に操作しフィードバックを得ることができない。

従来の触覚情報伝達システムに対し、著者らは、センサとして指型 GelForce[9]を、ディスプレイとして電気触覚ディスプレイ[10][11]をそれぞれ開発してきた。本論文においては、指型 GelForce と電気触覚ディスプレイを用いた分布触覚情報伝達システムを提案し、一本指用のマスター・スレーブシステムを構築する。従来の指型 GelForce における柔軟性の問題を解決することで、分布触覚情報の伝達を実現する。そして、提案システムの性能の中でも特に空間解像度を評価し、テレグジスタンスへの応用に対する有効性と課題を検証する。

2. 分布触覚情報伝達システム

本章では、提案する分布触覚情報伝達システムを構成する指型 GelForce と電気触覚ディスプレイの原理・特徴、さらに分布触覚情報の伝達手法を述べる。

2.1 指型 GelForce

著者らの開発した指型 GelForce[9]は、内部に2層の色付きマーカマトリクスが配置されている透明弾性体と、カメラから構成される(図2)。弾性体表面に力が加えられた場合、弾性体内部のマーカが移動する。マーカの移動量をカメラで計測し、計測された移動量から弾性体表面に加えられた3次元の力ベクトル分布を算出する。

指型 GelForce は円柱と球を組み合わせた形状であり、ヒト指の形状を模擬したものである。また、センサ本体は弾性体で構成されているため、ヒト指と同等の柔軟性を持たせることが可能と考えられる。さらに、指型 GelForce の空間および時間解像度はカメラ性能に依存するため、高スペックなカメラの開発により空間・時間解像度の向上が期待される。これらの理由から、テレグジスタンスのための触覚センサとして相応しいと考える。

先行研究[9]における指型 GelForce は、弾性体としてシリコーンゴムを用いており、ヤング率は 2.6×10^6 Pa 程度である。これは、ヒト指のヤング率(表皮: 1.4×10^5 Pa, 真皮: 8.0×10^4 Pa, 皮下組織: 3.4×10^4 Pa) [12]よりも大きく、テレグジスタンス用途に用いるためには柔軟性の改良が必要となる。柔軟性の改良に関しては3.2.1節において述べる。弾性体の円柱部と球体部の半径は、成人男性の人差し指の大きさを基準としており、それぞれ9.0 mm である。また、カメラとしては解像度が VGA (640 × 480)、更新レートが 66 fps の CCD カメラを用いている。弾性体内部のマーカとしては、移動量をサブピクセ

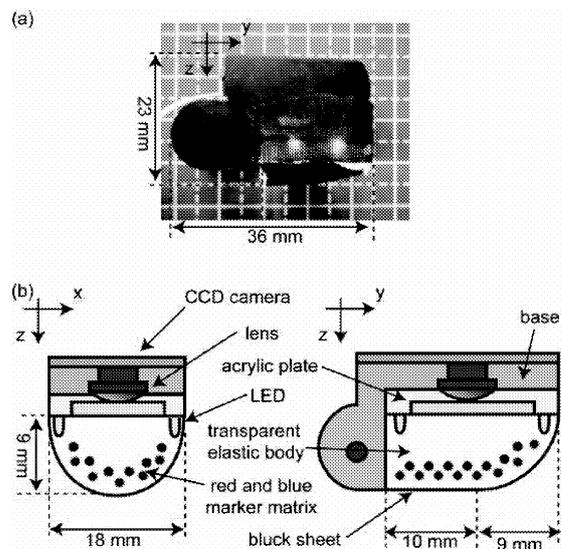


図2 指型 GelForce の外観(a)と構成(b) [9]
Fig.2 (a) Finger-shaped GelForce and (b) its configuration.

ル精度で計測できるように、直径 1.0 mm の球状マーカが 2.5 mm 間隔で配置されている。力ベクトルは 2.5 mm 間隔の 25 点で計測可能である。

2.2 電気触覚ディスプレイ

著者らの開発した電気触覚ディスプレイ[10]を図3に示す。電気触覚ディスプレイは電極ピンマトリクスから構成される。ある電極を陽極もしくは陰極、その周囲の電極をグラウンドに設定することで、電極から皮膚表面内部に電流を流す。この電流により、皮膚内部の機械受容器に繋がる神経を直接刺激し、触感を生成する。

電気触覚ディスプレイは情報提示にアクチュエータを必要としない。そのため、機械的に指を変形させるディスプレイに比べて、非常に小型で軽量に実装でき、電極ピンの高密度化も容易である。また、制御も容易であり、任意の周波数で安定した出力を得ることが可能である。基礎実験から、刺激位置を 1 mm の差まで知覚可能であることが確認されている。ただし、発汗や疲労により皮膚のインピーダンスが変化し、知覚閾値が変化する恐れがあるため、長時間使用する場合は刺激の強さ(電流値)を使用者自身で調整する必要がある。

なお、梶本ら[11]は、陽極と陰極それぞれを用いた電気刺激により、異なる機械受容器に繋がる神経を選択的に刺激可能であることを示唆している。陽極刺激は数十 Hz の振動感覚を誘発するため、マイスナー小体 (RA) と呼ばれる受容器に繋がる神経を刺激すると考えられる。一方、陰極刺激は定常的な圧の感覚を誘発するため、メルケル触盤 (SAI) と呼ばれる受容器に繋がる神経を刺激すると考えられる。さらに梶本らの実験[11]では、電気刺激を用いた触覚提示の性質として、陽極刺激は陰極刺激よりも空間解像度が高いことが示されている。その

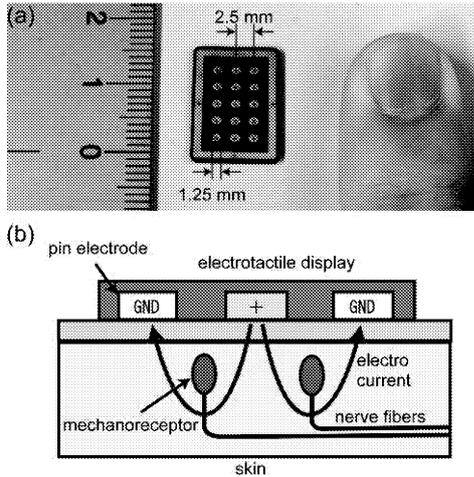


図3 電気触覚ディスプレイの外観(a)と原理(b) [10]
Fig.3 Electrotactile display: (a) electrodes. (b) stimulation of nerve fibers by electro current.

ため、本研究においては陽極刺激を用いる。

電気触覚ディスプレイは皮膚内部に電流を流すために、各電極ピンが指先の腹に接触している必要がある。そのため、電極板のサイズは17.0 mm×12.0 mmとする。電極ピンは3×5の15個とし、その周囲にグランド用電極を配置する。指型 GelForce の計測点間隔と同様に、電極ピンの中心間距離は2.5 mmであり、また電極ピンの直径は1.25 mmである。この場合、先行研究[10]における性能評価から、空間解像度は2.5 mmと示されている。電気刺激の制御はマイコンチップ H8 を用いて行う。電気刺激の提示周波数とパルス幅は、予備実験において安定して空間情報の提示が行えた値、30 Hz と 20 μs をそれぞれ用いる。電気刺激は、それぞれの電極ピンによる刺激を時間的に走査していくことで行われる。ある瞬間には1つの電極を陽極、それ以外をグランドに設定する。そして、陽極となる電極を100 μs ごとに変化させていくことで面状の触覚情報提示を実現する。刺激の強さは、刺激を明確に感じかつ痛みを感じない強度（最大で5 mA）に使用者自身で設定できる。

2.3 分布触覚情報の伝達

指型 GelForce が計測した力ベクトル分布情報を、電気触覚ディスプレイを用いて提示する。伝達する分布触覚情報としては、電気刺激のON-OFFにより接触の有無の空間分布のみを伝える方法と、電気刺激の強度変化により接触圧の強弱の空間分布を伝える方法とが考えられる。前者では、接触圧の情報が失われるものの、記号的な空間分布情報を明確に伝達可能なため、知覚精度が向上する可能性がある。しかし、把持操作においては空間分布と同様に、接触圧の強弱の知覚も重要と考える。そこで提案システムでは、後者の方法を採用し、指型 GelForce が計測する力ベクトルの位置と大きさを、電気刺激を行う電極位置と刺激の強度として提示する（図4）。

今回使用する電気触覚ディスプレイは、電極は2.5mm間隔で配置される3×5点であるため、指型 GelForce においても2.5mm間隔の3×5点で力ベクトルの計測を行う。各計測点における力ベクトルの大きさ $|f_i|$ [N]は、

$$|f_i| = \sqrt{f_{ix}^2 + f_{iy}^2 + f_{iz}^2} \quad (1)$$

となる。ここで、 i は計測点の番号 (<15)、 f_x, f_y, f_z は計測される力ベクトルの各軸方向成分を表す。また、各電極における刺激強度 I_i [mA]は、

$$I_i = \begin{cases} 0 & (|f_i| < f_{RES}) \\ \alpha |f_i| + I_{THR} & (|f_i| \geq f_{RES}) \end{cases} \quad (2)$$

となる。ここで、 α [mA/N]は力の大きさから電流値への変換係数、 I_{THR} [mA]は電気刺激の閾値であり、それぞれ使用者ごとに設定する。また、 f_{RES} は計測される力の分解能であり、指型 GelForce が物体と非接触状態の場合のノイズを除去し、不要な電気刺激が生じるのを防ぐ

3. 一本指用システムの構築

提案する分布触覚情報の伝達手法を用いて、一本指で用いる分布触覚情報伝達システムを構築する。

3.1 構成

システムの構成を図5に示す。一本指用システムとして、PHANToM Omni (SensAble Tec.)を用いて実装を行う。PHANToM Omniは、最大提示力が3.3 N、最大連続提示力が0.88 Nであり、一本指用システムとしては十分な性能を持つ。2台のPHANToM Omniそれぞれの先端に、プラスチック樹脂で作成した治具により指型 GelForce と電気触覚ディスプレイを搭載する。指型 GelForce を搭載した PHANToM Omni をスレーブ、電気触覚ディスプレイを搭載した PHANToM Omni をマスタとする。システムの制御には2台のLaptop PCを用いる。1台は2台のPHANToM Omniを、もう1台は指型 GelForce と電気触覚ディスプレイを制御する。

3.2 指型 GelForce の改善

3.2.1 ヒト指の柔軟性の模擬

著者らがこれまで作成してきた指型 GelForce は、ヤング率がヒト指に比べて大きい。そのため、弾性体部が物

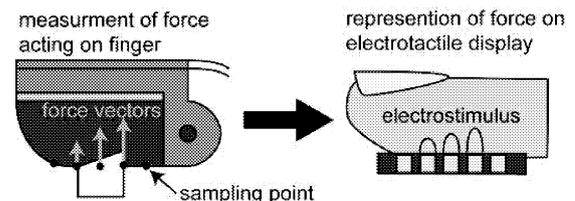


図4 GelForce の計測した力ベクトル分布情報に基づく電気触覚提示
Fig.4 Electrotactile stimulus based on force magnitude measured by GelForce.

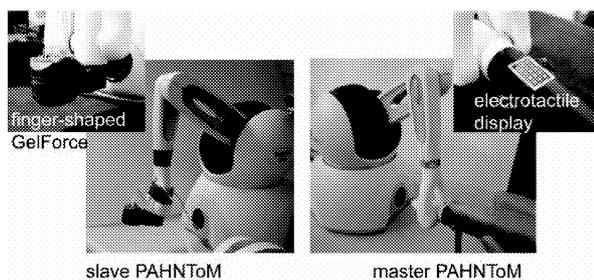


図5 指一本用分布触覚情報伝達システム
Fig.5 One-fingered system of proposed system.

体に接触した際に生じる変形がヒト指の場合とは異なってしまう。例えば、ヒトの指腹をある力で剛体の面に押し付けた場合、指腹が変形し表面全体が剛体と接触する。しかし、ヤング率の大きい指型 GelForce の場合、ヒト指と同じ力で押し付けると、弾性体部の変形が小さくセンサ表面の一部分のみが剛体と接触する。この場合、ヒト指で直接触れた場合とは異なる空間的な接触分布を計測することとなる。

以上の問題を解消するために、本論文で用いる指型 GelForce では、弾性体部に透明な人肌ゲル（エクシールコーポレーション社）を採用することとした。人肌ゲルは、主材と硬化剤の割合によって硬度を調整可能である。基礎実験の結果、主材と硬化剤を質量比 100 : 4.5 とした場合、ヤング率は約 5.0×10^4 Pa となった。これはヒト指の真皮や皮下組織に近い値であるため、指型 GelForce は物体接触時の変形状態を模擬すると考える。

また、柔軟な指型 GelForce では、力の大きさの計測解像度を向上させるために、色付きマーカに蛍光マーカを用い、直径を 1.25 mm と大きくした。他のパラメータは従来の指型 GelForce と同等である。

3.2.2 柔軟な指型 GelForce の性能評価

人肌ゲルを用いて構成した柔軟な指型 GelForce は、従来の指型 GelForce に比べて粘弾性体としての性質が強く、力計測の線形性が保たれる範囲や計測精度に影響が生じることが予想される。そこで、柔軟な指型 GelForce における計測の線形性と力の大きさの解像度、および空間解像度を評価した。

評価は文献[9]に記載されている方法に従い行った。以下では評価方法の概略のみを述べる。実験環境を図6に示す。実験では、xyz ステージ (VSQ-601XYV, 中央精機株式会社) に指型 GelForce を固定し、6軸力センサ (BL NANO, BL Autotech 社) に搭載したプローブを押し付け、指型 GelForce と 6軸力センサの出力を記録した。

まず、計測された力の線形性と大きさの分解能を評価した。指型 GelForce に、直径 10 mm の円筒型プローブの底面を、z 軸方向に 0 N ~ 5.0 N の力を 0.5 N 刻みで付加した。5回の計測結果を図7aに示す。横軸はプローブ

が加えた力、縦軸は指型 GelForce の計測した x, y, z 軸方向それぞれの力である。柔軟な指型 GelForce では、計測の線形性は 1.5 N 未満の範囲で保たれることが確認された。また、解像度は約 0.15 N で、z 軸方向の力のみを独立に計測できていることが確認された。

次に、空間解像度を評価した。ここでは、先端が直径 2 mm の球状のプローブを指型 GelForce の表面に押し付けた。押し付けた位置は、指型 GelForce の中心から x 軸方向 ± 2.0 mm の範囲において 0.5 mm 間隔の 7 点とした。力を加えた点から指型 GelForce の計測点までの距離を横軸に、正規化された力を縦軸にプロットした結果を、図7bに示す。計測された力の半値幅から、空間解像度は約 5.0 mm と確認された。

従来の指型 GelForce と比較した結果を表1にまとめる。線形性が保たれる範囲が 1.5 N 未満と狭くなった。1.5N の力が加わった際の指型 GelForce の変形量は、約 3 mm であった。一方で、ヒトの人差し指の指腹に対して垂直にプローブを押し付けていったところ、変形量の最大値も約 3 mm となった。そのため、線形性の保たれる範囲は減少したものの、指先に加わる力の計測範囲としては十分と考える。また、従来の指型 GelForce に比べ、力の大きさの解像度は向上し、空間解像度は同程度であった。以上より、改良した指型 GelForce は分布触覚情報を計測可能であることが確認された。

3.2.3 空間解像度の向上

今回改良した指型 GelForce は、空間解像度が 5.0 mm である。これは例えば、ある計測点に 1.0 N の力を一点で加えた場合、力を加えた計測点の周囲 2.5 mm 以内の計測点においても 0.5 N の力が計測されることを意味する。すなわち、最大 5.0 mm の計測誤差を生じてしまう。この計測された情報が電気触覚ディスプレイで提示された場合、点の接触が直径 5.0 mm の円柱面の接触に感じられる恐れがある。そこで、計測された力ベクトル分布情報をフィルタリングすることで、力計測の空間解像度を向上する。具体的には、ある計測点 A で観測された力の大きさが、隣接する計測点 B において観測された力の大きさの半分以下の場合、計測点 A の力の大きさを 0 とする。これにより、指型 GelForce による計測誤差を 2.5

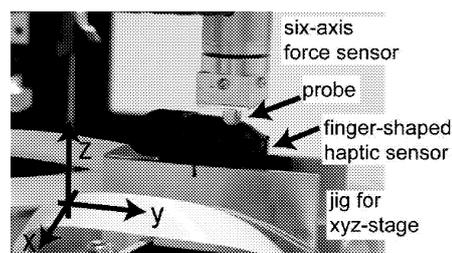


図6 柔軟な指型 GelForce の評価環境[9]
Fig.6 Environment for evaluation of finger-shaped GelForce.

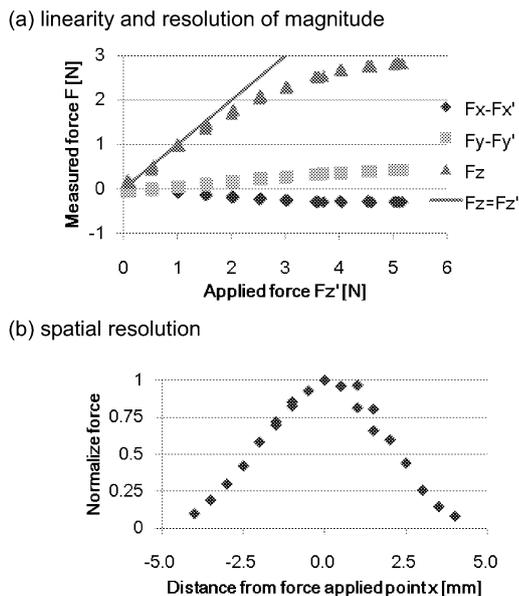


図7 柔軟な指型 GelForce の評価結果
Fig.7 Results for evaluation of finger-shaped GelForce.

mm 以内に抑えることが可能となる。

3.3 マスタ・スレーブ制御

指型 GelForce と電気触覚ディスプレイを搭載した PHANToM のマスタ・スレーブシステムの制御には、対称型の位置制御を用いる。制御の更新周波数は 1kHz である。PHANToM Omni は、位置姿勢計測自由度は 6 (x, y, z, pitch, yaw, roll) だが力提示自由度は 3 (x, y, z) であり、姿勢を制御することができない。そこで、姿勢の自由度は治具により物理的に固定し、位置情報のみの制御を行う。システムの使用者は、マスタの電気触覚ディスプレイ上に人差し指を置き、アームの先端を上下左右に動かすことで、スレーブの先端の指型 GelForce を操作する。指型 GelForce が物体に接触した場合、2.3 節の伝達手法に基づき分布触覚情報が伝達される。また、PHANToM の相互位置制御により物体の反力が提示される。

図 8 に、構築した分布触覚情報伝達システムを用いて物体に触れた場合の、計測される力ベクトル情報と提示される電気触覚情報を示す。物体形状は円錐の頂点と直方体の面で、センサの中心を 0.5 N 程度の力で押し付けた。矢印は計測された力ベクトル分布を、楕円球は提示する電気刺激を表す。図 8 より、分布触覚情報が伝達されていることが確認できる。

表 1 柔軟な指型 GelForce の性能評価結果
Table 1 Evaluation of soft finger-shaped GelForce.

パラメータ	従来[9]	柔軟
ヤング率	2.6×10^6 Pa	5.0×10^4 Pa
線形性	< 4.0 N	< 2.0 N
大きさの解像度	0.3 N	0.15 N
空間解像度	5.0 mm	5.0 mm

4. システム評価

構築した一本指用システムを用いて、提案システムの性能のうち空間解像度に関して評価した。

4.1 実験内容

提案システムは、多指ロボットハンドのマスタ・スレーブシステムに搭載し、物体の器用な把持操作を実現することを目標としている。物体の把持操作において、分布触覚情報の役割は大きく 2 つあると考える。1 つは、接触位置の認識である。物体が指のどの位置に接触しているかを認識することは、物体との接触を持続する上で重要となる。2 つ目は、接触面の認識である。接触面の広がりや物体の形状知覚に重要であり、把持方法の調整を可能にする。本論文では、接触位置認識の例として接触点の位置識別、接触面認識の例として接触線分の角度識別と接触線分の幅、という 3 種類の実験を行った。

4.2 実験方法

被験者は、マスタシステムを用いてスレーブシステムを操り、ランダムに提示される対象物体に 10 秒程度触れ、その接触位置や角度、幅を回答した。物体に触れる際、被験者はマスタシステムの様子を見ることはできない。また、実験中に被験者は回答の正否を知ることはできない。実験では、物体を配置した面に対して水平方向への移動を、PHANToM の制御により禁じた。指を自由に動かせる状況では、触覚の分布情報だけでなく、固有受容覚による接触状況の識別が行われる恐れがある[2]。また、なぞり動作を行う場合は、ヒト指の時間解像度も影響し、空間解像度が向上する現象（アクティブタッチ[13]）が報告されている。提案システムの空間解像度を評価するために、被験者の対象物体の触り方を、物体に対して指を垂直に押し付ける動作に限定した。

接触位置の識別実験においては、対象物体として円錐を用いた。構築したシステムでは、計測点と提示点はそれぞれ 2.5 mm ずつ離れている。そこで、円錐の接触位

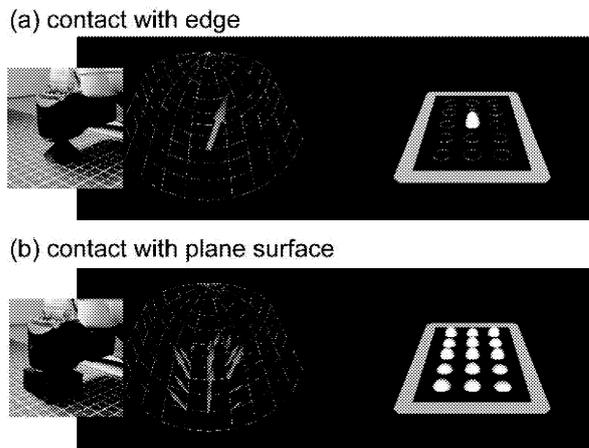


図 8 分布触覚情報の伝達
Fig.8 Transmission of distributed tactile information.

置は、指型 GelForce の中心、および前後左右に 2.5 mm ずらした位置の計 5 通りとした (図 9a)。線分角度の識別実験においては、対象物体として長さ 20.0 mm、幅 2.5 mm の直方体を用いた。構築したシステムの計測・提示点間隔から、45 度の角度の差が伝達し得る限界値と予想される。そこで、線分角度としては 0 度、45 度、90 度、135 度の 4 通りとした (図 9b)。線分幅の識別実験では、角度識別実験と同様の直方体を複数個並べたものを接触対象とした。構築したシステムが伝達し得る線分幅の限界値が 2.5 mm 刻みであるため、線分幅を 2.5 mm、5.0 mm、7.5 mm、10.0 mm の 4 通りとした (図 9c)。

被験者は、それぞれ右利きの 20 代男性 1 名と女性 2 名とした。被験者には、各実験の前に実験内容を説明し、実験の練習を 5 分程度行わせた。各識別実験の前に被験者毎の電気刺激の閾値 I_{THR} を計測した。全ての被験者の I_{THR} は約 1.0 mA だったため、(2) 式における α としては全被験者・全実験条件において同一の値を用いた (0.5 mA/N)。各識別実験において、それぞれの対象物体の状況は 10 回ずつ提示した。

4.3 結果

各識別実験の結果を図 10 に示す。それぞれ横軸は提示された対象物体の状況を、縦軸は回答率を示す。棒グラフとエラーバーはそれぞれ、対象物体の各状況に対する回答率の平均と標準偏差を表す。ここでは被験者ごとの回答率を求め、それらに対して平均と標準偏差を求めた。

位置識別の実験では、被験者は平均として 75% の正答率で接触位置を識別している。角度識別の実験においては、平均で 74% の正答率で線分の角度を識別している。幅識別の実験においては、2.5 mm 以外の幅の正答率が低く、40~50% 程度となっている。全体的な正答率の標準偏差は 10% 以下であるが、位置識別の“back”の条件においてのみ 28 % と、個人差が大きくなっている。

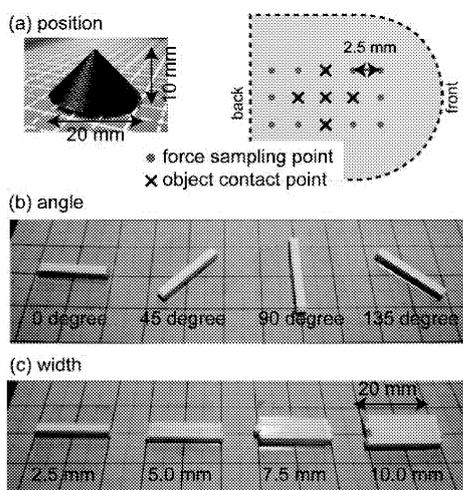


図 9 各実験条件で用いた対象物体と状況
Fig.9 Experimental settings.

各実験結果において、提示条件の回答に対して等分散性を仮定し、ANOVA により検定を行った。その結果、提示される接触位置と角度による有意差は確認されなかった ($F(14, 4) = 1.33, p = 0.34$), ($F(11, 3) = 2.37, p = 0.17$)。一方で、提示される幅による有意差が確認され ($F(11, 3) = 6.51, p < .05$), 多重比較から 2.5 mm と 7.5 mm の間に有意差が確認された ($t(11) = 4.11, p < .05$)。

5. 考察

前章の実験結果を基に、提案システムの空間解像度の現状と向上の可能性を検証する。さらに、多指ロボットハンドのマスタ・スレーブシステムに統合した場合の、把持操作に対する有効性を検証する。

5.1 提案システムの空間解像度

位置と角度の識別実験において正答率が約 74% となったことから、構築したシステムにおける位置弁別閾は 2.5 mm、角度弁別閾は 45 度と考える。すなわち、構築したシステムの空間解像度としては、計測・提示点間隔である 2.5 mm を達成したと考える。ここで、ヒト指の空間解像度は約 1.2~1.7 mm[14]と報告されており、各対象物体の状況は 100%に近い正答率で識別可能と推測できる。正答率が 74%に留まった理由としては、指型

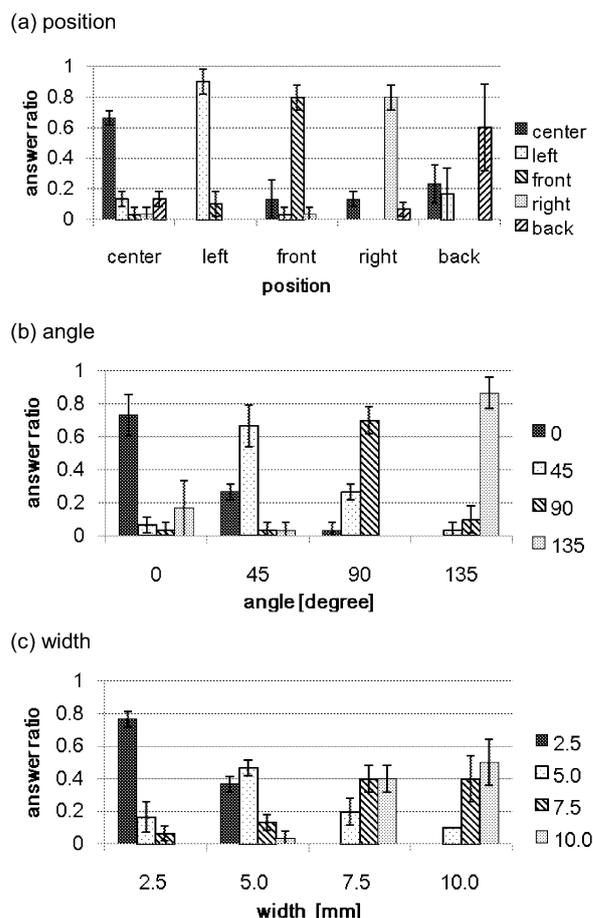


図 10 実験結果
Fig.10 Experimental results.

GelForce の計測誤差と電気刺激の漏れ電流の 2 つを考える。指型 GelForce では、3.2.3 節で述べたように、最大で 2.5 mm の計測誤差が生じる可能性がある。これは、指型 GelForce の空間解像度向上により解消できると考える。一方で、電気触覚ディスプレイは、隣接電極に電流を流す際の漏れ電流により空間解像度が低下する恐れがある。この漏れ電流は、電極間に電流を過剰に流し過ぎることが原因である。そのため、皮膚のインピーダンスを動的に計測し電流量を調整する[15]ことで解決可能と考える。また、位置識別において個人差が大きくなったのは、被験者によっては指腹位置による閾値の差が大きく、特定の箇所において電気刺激を適切に知覚できなかったと考える。この指腹位置による閾値の差も、皮膚インピーダンス計測により解消されると期待する。

線分幅の識別実験においては、2.5 mm の場合を除いて正答率は 40~50% である。また、全体して正解の幅より 5.0 mm 以上差のある幅と誤答した割合は 10% 以下である。そのため、線分幅の弁別閾は 5.0 mm であり、構築したシステムの空間解像度は、計測・提示点間隔の 2 倍の 5.0 mm と考える。空間解像度 2.5 mm が実現されなかった原因としては、実際にヒト指が物体に触れた際のエッジ強調が伝達されていない、ということを考える。ヒト指が物体に触れるとエッジ部分には応力集中が生じ、ヒトはエッジ部分を強く知覚する。そのため、ヒト指と物体との接触境界を明確に認識し、線分幅を知覚できる。しかし構築したシステムでは、エッジ部分の強調が伝達されず、面的な接触がぼやけた情報として伝達されたと考える。エッジ強調の伝達は、指型 GelForce の計測するカベクトル分布情報を元に応力集中を算出し、応力集中部の電気触覚提示を強めることで実現できる。応力集中を算出・提示するためには、サンプリング定理に基づけば、分布触覚情報システムには目標とする解像度の 2 倍の解像度が必要になる。

以上より、提案システムにおける、空間解像度向上の可能性を検証する。現在の電気触覚ディスプレイにおいては、空間解像度の限界値は 1.0 mm 程度である。これは、電極ピン間隔を 1.0 mm とすることで実現される。一方で指型 GelForce においては、弾性体内部のマーカ間隔を 1.0 mm 以下で配置しカメラ解像度を向上させることで、空間解像度 1.0 mm を実現できる。この場合、システムの空間解像度としては 2.0 mm が推定される。

ここで、目標となるヒト指の空間解像度は約 1.2~1.7 mm [14]であり、推定される提案システムの空間解像度の限界値より高い。提案システムにおいてヒト指の空間解像度を実現するためには、電気触覚ディスプレイの空間解像度の限界値を向上させる必要があり、今後の研究課題である。皮膚内部における電流経路を狭める電極配置や提示手法を検討していくことで、空間解像度の限界値の向上に取り組んでいく。

5.2 多指ロボットハンドシステムへの応用

本論文における実験は、把持操作に必要な分布触覚情報のうち一部を抽出して行ったものであり、あらゆる把持操作にとって有効であることを示すものではない。しかし、3 種類の実験結果から、提案システムはいくつかの把持操作にとって有効であることが推測できる。

提案する分布触覚情報伝達システムでは、計測・提示点間隔の精度で、接触位置や線分角度の情報を伝達可能である。これにより、物体を把持する際に指の先端ではなく指腹の中心で物体を捉え、安定した把持を実現できると考える。物体の指腹面での移動を認識し、把持力を調整し滑り落ちを防ぐことも可能となる。さらに、先行研究[3][4]に見られるように、物体のエッジ部分をなぞる、といったトレーシングタスクにおいても有効である。また、計測・提示点間隔の 2 倍の精度であるものの、線分幅の情報も伝達可能である。線分幅と線分角度、すなわち接触面の広がりや伝達することで、把持物体の形状知覚が可能になる[2]と考える。把持物体の特徴点を認識することは、把持操作の戦略を立てるうえで重要な要素となる。これらの把持操作は、提案システムの空間解像度の向上に伴い精度が高まることが期待できる。

ただし、以上で述べた把持操作を実現するためには、提案システムの空間解像度だけではなく、時間的な応答性、時間解像度も重要になると考える。伝達システムにおける遅延が大きければ、物体との接触を知覚することさえ困難になる。また、例えば指腹面での物体移動の認識効率には、時間的変化の要素が大きく作用すると考え。実際、物体に対して指をなぞるように動かした場合は、触覚の空間解像度が向上することが報告されている[13]。今後は、提案システムの空間解像度だけではなく、時間解像度の検討・評価を行っていく必要がある。

6. おわりに

本論文においては、指型 GelForce と電気触覚ディスプレイを用いた分布触覚情報伝達システムを提案した。従来の指型 GelForce における柔軟性の問題を解決することで、一本指用のシステムを実現した。構築したシステムの空間解像度の評価として、接触状況の識別実験を行った。実験結果から、提案システムの空間解像度は現状として 2.0 mm を実現可能であることが示唆された。さらに、多指ロボットハンドのマスタ・スレーブシステムへ応用した場合、トレーシングタスクや形状知覚などの把持操作において有効であることが示唆された。

今後は、指型 GelForce と電気触覚ディスプレイの両面で空間解像度の向上を行っていく。それと同時に、把持操作における時間解像度の重要性を検討し、また提案システムの時間解像度を評価していく。そして、ロボットハンドやマスタハンドに搭載し、器用な把持操作が実現可能であることを実証していく。

また、提案システムでは、電気触覚ディスプレイは指型 GelForce の計測する力の接線成分を提示していない。接線力もまた、器用な把持操作において重要な情報である。接線力の提示は、「触原色原理[16]」に基づく受容器の選択的刺激を用いることで実現できると期待する。「触原色原理」とは、視覚における光の三原色に対比させた概念であり、異なる特性を持つ受容器の選択的刺激を組み合わせることで、多様な触覚提示を実現する試みである。将来的には、電気触覚ディスプレイによる受容器選択的刺激を利用することで、接線力を含んだ分布触覚情報の伝達システムの実現を目指す。

謝辞

本研究の一部は、特別研究員奨励費（課題番号 20・10009）および戦略的創造研究推進事業（CREST）の助成を受けたものである。また、電気触覚ディスプレイは、電気通信大学の梶本裕之准教授の技術的援助を受けて構築したものである。

参考文献

- [1] Tachi, S., Kawakami, N., Nii, H., Watanabe, K. and Minamizawa, K.: TELEsarPHONE: Mutual Telexistence Master Slave Communication System based on Retroreflective Projection Technology; SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.1, No.5, pp.335-344 (2008)
- [2] 佐藤, 梶本, 川上, 館: 電気式皮膚感覚と力覚の統合による形状感覚提示; ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.9, No.3, pp.71-76 (2007)
- [3] 佐藤, 梶本, 川上, 館: 器用な物体操作のための電気式皮膚感覚と力覚の統合; 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007, 1A2-A12 (2007)
- [4] Khachatourov, A., Castet, J., Florens, J.L., Luciani, A. and Lenay, C.: Integrating tactile and force feedback for highly dynamic tasks; Technological, experimental and epistemological aspects; Interacting with Computers Vol. 21, pp. 26-37 (2009)
- [5] 篠田: 器用な手の皮膚と触覚; 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 767-771 (2000)
- [6] Kontarinis, D. and Howe. R.: Tactile display of vibratory information in teleoperation and virtual environments; Presence, Vol. 4, No. 4, pp. 387-402 (1995)
- [7] 山内, 昆陽, 岡本, 日高, 前野, 田所: マスタ・スレーブ型触覚伝達システムの開発 第4報: 粗さ・摩擦・硬軟を含む多様なテクスチャ感の遠隔伝達; 第14回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2009)
- [8] Methil, N.S., Shen, Y., Zhu, D., Pomeroy, C.A., Mukherjee, R., Xi, N. and Mutka, M.: Development of supermedia Interface for Telediagnosics of Breast Pathology; in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3911-3916 (2006)
- [9] Sato, K., Kamiyama, K., Kawakami, N. and Tachi, S.: Finger-shaped GelForce: Sensor for Measuring Surface Traction Fields for Robotic Hand; IEEE Transaction on

Haptics, Vol. 3, No. 1, pp.37-47 (2010)

- [10] Sato, K., Kajimoto, H., Kawakami, N. and Tachi, S.: Electrotactile Display for Integration with Kinesthetic Display; Proceedings of 16th IEEE International Symposium on Robot & Human Interactive Communication 2007, pp. 3-8 (2007)
- [11] 梶本, 稲見, 川上, 館: 電気触覚を用いた皮膚感覚のオーグメンティドリアリティ; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 3, pp. 339-348 (2003)
- [12] 前野, 小林, 山崎: ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係; 日本機械学会論文集 (C編), 63巻, 607号, pp. 247-254 (1997)
- [13] Jones, L. A., Lencnerman, S. J.: HUMAN HAND FUNCTION; Oxford University Press (2006).
- [14] Bermudez, F.B. and Johnson, K.O.: Differences in spatial acuity between digits; Neurology, Vol. 56, pp. 1389-1391 (2001)
- [15] 梶本: 皮膚インピーダンス情報のリアルタイムフィードバックを可能とする電気触覚ディスプレイ; 第10回 SICE SI 講演会, pp.173-176 (2009)
- [16] 館: バーチャルリアリティにおける触覚の役割; 電気学会論文誌E, Vol.122, No.10, pp.461-464 (2002) (2009年11月1日受付, 2010年3月15日再受付)

著者紹介

佐藤 克成



平18 東北大・工・電応・情報卒業。平20 東大・情報理工・システム情報学専攻修士課程卒業。同年同専攻博士課程進学, 日本学術振興会特別研究員 (DC1) テレグジスタンスにおける力触覚情報の計測と提示に関する研究に従事。情報理工学系研究科研究科長賞, 日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞受賞。

館 暉 (正会員)



昭43 東大・工・計数卒。昭48 同大大学院博士課程修了。工学博士。同年同大助手。昭50 通産省工技院機械技研研究員, マサチューセッツ工科大学客員研究員, 東大・先端科学技術研究センター教授を経て, 平6 東大・工・計数工教授, 平13 同大大学院・情報理工教授, 平21 名誉教授, 同年 慶應大学大学院メディアデザイン研究科教授。テレグジスタンス, 人工現実感の研究に従事。IEEE/EMBS 学会賞, 通産大臣表彰, 国際計測連合 (IMEKO) 特別功労賞, IEEE-VR Career Award など受賞。IMEKO ロボティクス会議議長, 計測自動制御学会第46期会長, 日本バーチャルリアリティ学会初代会長。