

# トレイグジスタンスの研究（第 67 報） - カベクトルと温度情報による触感伝送 -

佐藤克成<sup>\*1</sup> 南澤孝太<sup>\*2</sup> 古川正紘<sup>\*2</sup> 舘 暲<sup>\*2</sup>

Study on Telexistence LXVII: Haptic Transmission using Force Vector and Temperature

Katsunari Sato<sup>\*1</sup>, Kouta Minamizawa<sup>\*2</sup>, Masahiro Furukawa<sup>\*2</sup>, and Susumu Tachi<sup>\*2</sup>

**Abstract** — 本稿では、Telesar5 の指先における触感伝送システムの設計と実装について述べる。ヒトは、皮膚の変形と温度変化の両方を統合的に知覚し触感を得ていることが知られている。そのため Telesar5 においては、カベクトル分布と温度を同時に伝達可能な触感伝送システムを構築した。ロボットハンドの指先に光学式センサを搭載し、ロボットハンドがモノに触れた際、指先に加わるカベクトルと温度情報を同時に計測する。計測された情報は、ロボットハンドの操作者の指先に対して、PST トレイグジスタンスマスタシステムに搭載した触覚ディスプレイにより提示される。

**Keywords** : Haptic Transmission, Force Vector, Temperature

## 1. はじめに

ヒトは、触れたモノの重さやテクスチャなどの触感を感じることで、モノを適切に把持し操作することができる。我々は、トレイグジスタンスロボットシステム Telesar5[1][2] (図 1) の構築を通して、この触感情報を伝送する技術の実現に取り組んでいる。Telesar5 とは、視聴覚と触覚を融合して遠隔地にリアルタイムに伝送するための、実証研究プラットフォームである。Telesar5 の使用者は、遠隔地において対象を目視により確認しながら自在に腕を動かし、自然な触動作を行える。さらに指先において触感情報の伝送を行うことで、遠隔地のヒトやモノをあたかも自分の手で対象に直接触れたように感じながら、遠隔コミュニケーションや遠隔作業を実現できる。

ヒトが知覚する触感は、Lederman ら[3]の触運動を分類する研究を参考にすれば、硬さ、重さ、テクスチャ、形状（全体の形状と細部の形状）、温度の 5 種類に大別できる。触感情報の伝送システムとしては、これら全ての触感が伝送されることが望ましい。従来の指先における触感伝送システムでは、5 種類の触感情報のうち一部の伝送を実現している。例えば昆陽ら[4]は、粗さ感や硬軟感、摩擦感といった複数の触覚因子を同時に伝送するシステムを構築している。このシステムを

用いることで、遠隔地のモノの硬さやテクスチャを知覚することが可能となる。一方佐藤ら[5]は、空間的に分布する触圧覚情報と温度感覚情報を同時に伝送可能なシステムを構築している。このシステムにおいては、遠隔物体の硬さや形状、温度を知覚できる。しかし、5 種類の触感情報を網羅的に伝送するシステムは未だ実現されておらず、遠隔コミュニケーションや遠隔作業において、あたかも自分の手を用いたような高い臨場感を得られるまでには至っていない。

本稿では、5 種類の触感情報の網羅的伝送を実現する、Telesar5 の指先におけるカベクトルと温度情報の伝送システムの設計と実装について述べる。

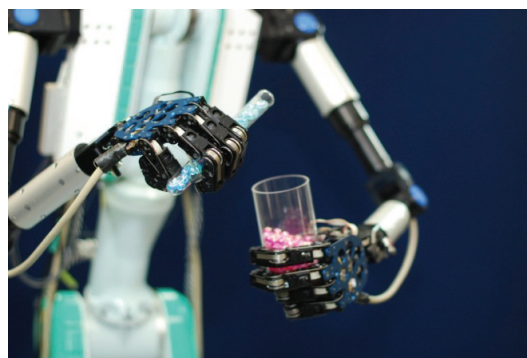


図 1 Telesar5[1][2]による遠隔作業

Fig. 1 Remote manipulation conducted by Telesar5

<sup>\*1</sup>: 日本学術振興会／慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科, sato@tachilab.org

<sup>\*2</sup>: 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科, {kouta, furukawa, tachi}@tachilab.org

<sup>\*1</sup>: JSPS / Graduate school of system design and management, Keio University

<sup>\*2</sup>: Graduate school of media design, Keio University

## 2. 触感伝送システムの設計

### 2.1 触感の知覚

伝送システムを設計するために、まずはヒトの触感知覚メカニズムを考える。

ヒトは、主に固有受容感覚と触覚（皮膚感覚）を統合的に解釈することで、触感を得ている[6]。固有受容感覚とは、体の運動や位置・姿勢の感覚、および力覚で、筋肉や腱、関節などに存在する受容器応答から知覚される。一方触覚とは、皮膚表面における圧覚や振動覚、温度感覚で、皮膚内部の表面付近に存在する受容器応答から知覚される。さらに触感の知覚においては、固有受容感覚と触覚以外にも、視覚など他の五感情報も統合的に用いられることが確認されている。

触感の中で硬さと重さ、すなわち接触時に指先に加わる3次元的な力は、主に力覚と圧覚により知覚される。特に力の強度が弱い場合、知覚における触覚の重要性が高くなるのが指摘されている[7]。さらに、Pseudo-haptic[8]のように、視覚情報によって硬さ知覚が変化することが報告されている。テクスチャは、数十～数百 Hz 程度の指先の振動として、主に振動覚により知覚される[9]。形状は、指にモノが接触した状態における運動や位置・姿勢感覚により知覚される。またエッジや微細な凹凸など細部の形状を知覚する際には、指先に加わる力の分布、すなわち圧覚の空間的な分布情報も重要となる[10]。また温度は、皮膚表面の温度変化、すなわち温度感覚により知覚される。

### 2.2 Telesar5 における触感伝送システム

前節より、5種類の触感を知覚可能な触感伝送システムとしては、理想的には固有受容感覚と触覚全ての要素を扱うことが望ましいと考えられる。すなわち触感情報の伝送は、システム使用者の手指の運動を遠隔地において再現しつつ、遠隔地において指先に加わる3次元的な力や振動、温度を使用者にフィードバックすれば良い。しかし、全ての固有受容感覚と触覚を扱う、特に力覚を扱うためには、デバイスが煩雑化し実装や制御が困難になる。

ここで Telesar5 では、触る対象の様子を目視により確認しながら、自然な触動作が実現できる。また、ヒトが5種類の触感を知覚する際に指に加える垂直力の大きさは、0-6N 程度[11]と見積もることができる。このような指先に加わる力が小さい触動作を行う場合には、ヒトの統合的な触感知覚特性から、視覚と運動や位置・姿勢感覚、触覚

により、力覚を補間できると考える。すなわち Telesar5 においては、力覚のフィードバックが無くとも、触覚のフィードバックのみを行えば、5種類の触感を十分に知覚できると考える。そこで我々は、Telesar5 の指先における触感伝送システムとして、触覚情報のフィードバック機構を備えた、人型ロボットハンドのマスタスレーブシステムを提案する。

マスタシステムは、ヒトの手指の運動や位置・姿勢を計測する装置と、触圧覚および温度ディスプレイから構成する。運動計測には、各指の3次元的な位置を計測できる装置を使用する。触圧覚ディスプレイには、Gravity Grabber[12]と経皮電気刺激[10]の技術を採用する。Gravity Grabberは、2つの小型モータにより指腹部に接するベルトを巻き上げることで、皮膚表面に対する垂直直と剪断力を提示する(図2)。これにより、モノの重さや硬さ、テクスチャを再現できる。シンプルな構成であるため、手指の運動計測装置へ容易に搭載できる。一方で経皮電気刺激は、皮膚表面に配置した電極マトリクスから皮膚内部に電流を流し、受容器神経を直接発火させること出触圧覚を提示する。電流を流す電極や、電極に印加する電荷の陽陰を制御することで、任意の位置に対し圧覚や振動覚を選択的に提示できる。これにより、細部の形状を再現できるほか、電気刺激の信号を時間的・空間的に設計することでテクスチャを再現することも可能である[13]。電極マトリクスをフレキシブル基板で作成することで、Gravity Grabber のベルト部に搭載することが可能である。さらに温度を提示するために、Gravity Grabber のベルト部分には温度ディスプレイも搭載する。

スレーブシステムは、マスタシステムが計測した手指の運動を再現する人型ロボットハンドと、その指先の触圧覚および温度センサから構成する。ヒト型ロボットハンドは、ヒトの触動作を再

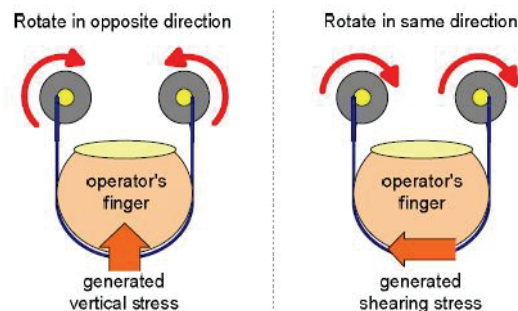


図2 垂直力と剪断力の提示原理 [12]

Fig. 2 Generating method of vertical and shearing forces.

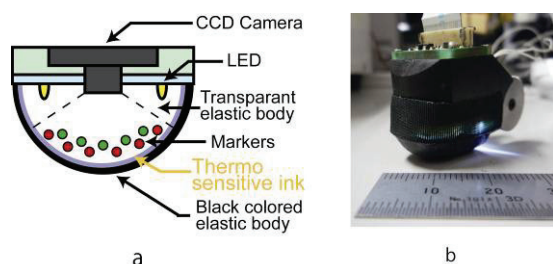


図 3 光学式触覚センサ[13]

a. 内部構成 b. 外観

Fig. 3 Vision-based cutaneous sensor. a. Configuration, b. appearance

現できる多自由度ハンドを用いる。ロボットハンドの指先に搭載するセンサとしては、光学式皮膚感覚センサ[14] (図 3) の技術を採用する。このセンサは、分布触圧覚ベクトルセンサと温度センサの両方の役割を有する。弾性体内部のマーカの変位や示温塗料の色相変化をカメラで計測することにより、表面に加わる 3 次元力ベクトルの分布と温度変化を同時に計測できる。ヒトの指と同等の大きさや形状であるため、人型のロボットハンドの指先に容易に搭載可能である。

### 3. 触感伝送システムの実装

前章の設計に基づき、触感伝送システムを実装した。

マスタシステムにおける指の運動や位置・姿勢の計測装置としては、旭光電機株式会社と共同開発した FST (Flexible Sensor Tube) テレイグジスタンスマスタシステムのグローブ (図 4a) を用いた。FST グローブの計測自由度は、親指が 4 自由度、その他の指が各 2 自由度の計 12 自由度である。そのため、アブダクションを除いたヒトの指先の動作を計測可能である。FST グローブは、手の位置・姿勢を計測する FST チューブの先端に繋いだ。薬指と小指は触動作において使用頻度が少ないと考え、触覚ディスプレイは FST グローブの親指と人差し指、中指の指先部に搭載した。温度ディスプレイにはペルチェ素子を採用した。なお、本実装においては電極基板を搭載していないため、細部の形状知覚を行うためには能動的な触動作が必要となる。

スレーブシステムにおけるロボットハンドとしては、川渕機械技術研究所の人型ロボットハンド (図 4b) を用いた。このロボットハンドは、親指 5 自由度、人差し指 3 自由度、中指～小指 2

自由度、アブダクション 1 自由度の計 15 自由度を有しており、薄い紙を掴むなど、ヒトの指の動作を十分に再現できる。また、最大で 5N 程度の把持力を出力できる。ロボットハンドは人型ロボットアームの先端に装着した。ロボットハンドの指先には光学式の触覚センサを搭載した。触覚センサでは、センサ表面に加わる力ベクトルと温度を 120Hz で計測する。今回の実装においては触圧覚ディスプレイが提示できるのは 1 点の力ベクトルなため、計測も指腹中央の 1 点でのみ行う。力ベクトルの計測分解能は 0.1N、計測範囲は 0N～5N 程度である。また、温度の計測範囲は 25°C～35°C 程度である。

触感伝送システムの利用者は、マスタシステムを装着して手指を動かすことにより、ロボットハンドの手指を自在に操作し、遠隔地のヒトやモノに触れることが可能である。ロボットハンドの指先がヒトやモノに触れた場合、センサ表面に加わる力ベクトルと温度変化が触覚センサにより計測される。計測された情報は、力ベクトルの垂直および剪断方向成分が触圧覚ディスプレイにより、温度変化がペルチェ素子により操作者に提示される。これらのフィードバックを、自身の運動や視覚と共に感じることで、操作者は遠隔地のヒトやモノの触感を得られる。

なお、構築したシステムでは、伝送できるテクスチャ (振動覚) 情報が低周波の範囲に限られている。これは主に触覚センサの更新レートによるものである。そのため、今後のカメラ技術の向上により、高フレームレートの小型カメラが開発されることで、伝送できるテクスチャの種類が増加が期待できる。また提案システムでは、重たいモノやエッジを有するモノに触れた際の触感を正確には伝送できない。重さに関しては、例えば手

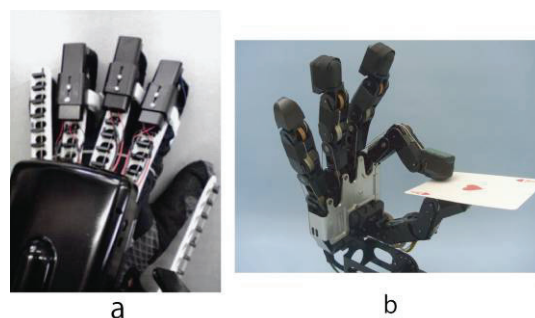


図 4 a. 触覚ディスプレイを搭載した FST グローブ b. 人型ロボットハンド

Fig. 4 a. FST glove with tactile display, b. Humanoid robotic hand

首に対して1軸の力覚を計測・提示することで、触感が向上することが報告されている[7]。また形状の提示に関して、今後は触圧覚ディスプレイに電極基板を搭載し、触覚の分布情報提示に取り組む。

#### 4. おわりに

本稿では、Telesar5の指先における触感情報伝送システムを提案し、その設計とその実装について述べた。今後は実装したシステムを用いて、遠隔コミュニケーションや遠隔作業における触感情報伝送の有効性を検証する。

#### 謝辞

本研究は戦略的創造研究推進事業（JST-CREST）「さわれる情報環境」プロジェクトおよび特別研究員奨励費の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] 舘暲, 南澤孝太, 古川正紘, 佐藤克成: テレイグジスタンスの研究 (第65報) Telesar5: 触覚を伝えるテレイグジスタンスロボットシステム, エンタテイメントコンピューティング2011 (2011)
- [2] 古川正紘, 佐藤克成, 南澤孝太, 舘暲: テレイグジスタンスの研究 (第66報) Telesar Vを用いた目と手の協調による遠隔作業, エンタテイメントコンピューティング2011 (2011)
- [3] Lederman, S.J. and Klatzky, R.L.: Hand movements: A window into haptic object recognition, *Cognitive Psychology*, Vol. 19, pp. 342-368 (1987)
- [4] 昆陽雅司, 山内敬大, 岡本正吾, 日高佑輔, 前野隆司, 田所諭: 複数の触感因子を伝えるマスタ・スレーブ型触力覚伝達システム, 第15回ロボティクスシンポジウム, pp. 541-547 (2010)
- [5] 佐藤克成, 篠田裕之, 舘暲: 遠隔物体の形状と温度の知覚が可能な力触覚情報伝達システム, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomec2011) (2011)
- [6] 岩村吉晃: タッチ (神経心理学コレクション), 医学書院 (2001)
- [7] Minamizawa, K., Prattichizzo, D., and Tachi, S.: Simplified Design of Haptic Display by Extending One-point Kinesthetic Feedback to Multipoint Tactile Feedback, in Proc. of IEEE Haptics Symposium 2010, pp.257-260 (2010)
- [8] Lécuyer: Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback, *Presence*, Vol. 18, pp. 136-144 (2009)
- [9] Lederman, S.J. and Klatzky, R.L.: Sensing and Displaying Spatially Distributed Fingertip Forces in Haptic Interfaces for Teleoperator and Virtual Environment Systems, *Presence*, Vol. 8, No. 1, pp. 86-103 (1999)
- [10] 佐藤克成, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暲: 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)
- [11] 仲谷正史, 川副智行, 豊田成人, 木下智史, 和田潤: 指の変形に注目したウェアラブル接触力センサシステムの検討, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会2010, 1A1-C22 (2010)
- [12] 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暲: バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 3, No. 1, pp.15-23 (2008)
- [13] 廣部祐樹, 黒木忍, 佐藤克成, 吉田匠, 南澤孝太, 舘暲: Colorful Touch Palette, インタラクティブ東京2010 (2010)
- [14] 佐藤克成, 篠田裕之, 舘暲: 光学式皮膚感覚センサのための示温塗料とカメラを用いた温度計測, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 3 (2011)