

テレイグジスタンスの研究（第 96 報）

—TELESAR VI : 67 自由度を有するテレイグジスタンス AVATAR システム—

Study on Telexistence XCVI

- TELESAR VI : Telexistence Avatar System with 67 DOF -

館 暉¹⁾, 井上康之¹⁾, 加藤史洋¹⁾, Charith Fernando²⁾, Yamen Saraiji²⁾

Susumu TACHI, Yasuyuki INOUE, Fumihiro KATO, Charith FERNANDO and Yamen SARAIJI

1) 東京大学高齢社会総合研究機構

(〒113 東京都文京区本郷 7-3-1, {tachi, y-inoue, fumihiro.kato}@tachilab.org)

2) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

(〒223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1, {charith, yamen}@kmd.keio.ac.jp)

Abstract: TELESAR VI (TELEExistence Surrogate Anthropomorphic Robot VI) is a newly developed telexistence platform for the ACCEL Embodied Media Project. It was designed and implemented with a full body mechanically unconstrained master cockpit and a 67 degrees-of-freedom (DOF) anthropomorphic slave robot. The system provides a full-body experience of our extended “body schema,” which allows a human to maintain up-to-date representation in space of the positions of his/her various body parts, including his/her head, torso, arms, hands, and legs.

Key Words: telexistence, telepresence, virtual reality, haptics, master-slave system

1. はじめに

テレイグジスタンスの概念[1]は、1980 年 9 月に我が国で生まれ[2]、特許[3]、最初の視覚テレイグジスタンス装置の構築とそれによる実験結果の国内発表[4]、国際会議での発表[5]、移動型テレイグジスタンスシステム[6]、人間型テレイグジスタンスロボットシステム TELESAR [7]、二足歩行ロボットでの実験[8]が行われ、その実現可能性と有効性が示されている。

「臨場感」と「存在感」を具備した相互テレイグジスタンスの考えが 1999 年に発表され[9]、再帰性投影技術 (RPT: Retro-reflective Projection Technology) を用いた相互テレイグジスタンスの視覚系の検証実験が行われた[10]。2005 年の愛知万博では、人間型ロボットシステム TELESAR II [11]が構成され、公開実験を通して、相互テレイグジスタンスの実現可能性と有効性が示された。

自分自身の認識や存在を解明することを目的として、人間とのインタラクションを容易に行えるテレイグジスタンスマスタースレーブシステム TELESAR III を構成し、身体性の拡張や自己の認識を中心とした評価実験が行われた[12]。

TELESAR IV システムでは、全方向移動ロボットに全周囲ステレオカメラ VORTEX を搭載しアームとハンドを有し

た代理ロボットを用いて、イベント会場に遠隔参加するための実証実験が行われた。遠隔からの参加者は、TWISTER[13]を用いて、VORTEX から送られてくる 360 度のフルカラーの実時間ステレオ映像を、特殊な眼鏡などを使うことなく裸眼で観測でき全周囲音響を聞き、イベント会場に集う参加者とジェスチャーを交え「臨場感」を有してコミュニケーションできる。一方、会場参加者も、通常の会話だけではなく、TWISTER の外側の円周上を移動制御されるカメラで撮影された遠隔参加者の映像が RPT でロボットに投影され、それを任意の方向から見ることができ、かつ、握手をしたりできることから、遠隔参加者の「存在感」を感じることができる[14]。

視覚と聴覚に関するテレイグジスタンスの実現可能性和有効性が上記のシステムから明らかになったが、加えて、触覚（体性感覚）を付与することを目指して TELESAR V が構築された[15]。触覚は、固有受容感覚と皮膚感覚に分類されるが、そのうち、いわゆる力覚といわれる固有受容感覚については、テレイグジスタンスより以前のテレオペレーションにおいて既に、力帰還型のバイラテラル制御やインピーダンス制御などを通じて、その実現可能性和有効性が明らかになっている。TELESAR V では、皮膚感覚を中心にして、物体の‘つるつる感’や‘ざらざら感’、ある

いは「ぬくもり」などを固有受容感覚とともに能動的に伝えるハapticテレイグジスタンスを目指した。遠隔にあるスレーブロボットが人間の運動に追従し、スレーブの頭部に搭載されたロボットの目と耳で捉えた視界と音響が、マスターの視聴覚提示システムにより、人間に臨場的に提示される。また、スレーブの腕と手が人間の腕と手に追従して動き対象物とコンタクトし、その触覚情報を視聴覚と矛盾なく人が感じることで、人は遠隔に居ながらロボットの居る場所に居るような感覚を有して「見たところを見たように触る」ことが、限られた触感ではあるが可能となった。しかし、身体の自由度が人間の自由度に比べ不足しており、また触覚も3本指にとどまり、伝達できる触感も限られていることから、身体性を人間にさらに近づけたテレイグジスタンスプラットフォームが求められていた。

著者らは、JST ACCEL プロジェクト「触原色に立脚した身体性メディア技術の基盤構築と応用展開」(身体性メディアプロジェクト)において、触原色原理に基づき小型・一体型の触覚伝送モジュールを開発し産業界や一般のユーザーに広く提供することで、触覚を持つ身体的経験の記録、伝送、再生に基づく製品やサービスの早期創出を推進している。

上記プロジェクトの一環として、TELESAR V の後継機の身体性プラットフォームである、67自由度という人間に近い自由度を有し、触原色原理に基づいてすべての指の触感を伝えるテレイグジスタンス AVATAR システム TELESAR VI を研究開発した。本報では、その設計方針、システム構成ならびにシステムの概要について報告する。

2. JST ACCEL 「身体性メディア」プロジェクト[16]

ACCEL プロジェクト「触原色に立脚した身体性メディア技術の基盤構築と応用展開」においては、触原色原理に基づき小型・一体型の触覚伝送モジュールを開発し産業界や一般のユーザーに広く提供することで、触覚を持つ身体的経験の記録、伝送、再生に基づく製品やサービスの早期創出の推進を図ってきた。放送分野やエンターテインメント分野での実用化を志向した「身体性コンテンツプラットフォーム」、およびロボットを用いた遠隔就労という新しい産業の可能性を示す「身体性テレイグジスタンスプラットフォーム」の2つの実証システムを構築し、社会的・経済的インパクトを与えるイノベーションの実現を目指している。

本研究開発課題では、2014年12月から2019年11月までの5年間、視覚や聴覚と同様に触覚の検出・記録・伝送・再生を可能とすべく触原色原理を基にした触覚伝送モジュールを開発・試作し触原色原理のコンセプトを実証すること、および遠隔地にいるロボットをコントロールし自分の分身として実社会の中での活動を可能にさせる技術であるテレイグジスタンス(アバター)のコンセプトを実証すること、これらを通して技術基盤を社会実装へ橋渡しすることを目的に研究開発を進めてきた。図1に、このプロ

ジェクトの概略を示す。

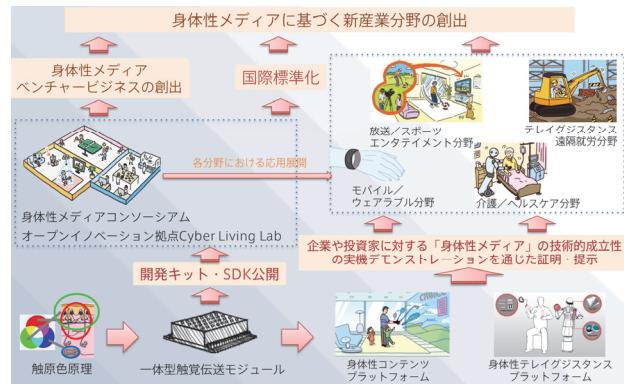


図1 「身体性メディア」プロジェクトの概略

Fig. 1 General Plan of Haptic Media Project

触覚機能の研究開発では、東京大学、慶應義塾大学、電気通信大学、奈良女子大学に加えて、アルプスアルパイン(株)および日本メクトロン(株)と共同して、触原色原理を基にした各種小型モジュールを試作し、ウエアラブル触覚伝送技術としては触原色グローブ、全身スーツなどに展開した。また、研究開発にとどまらず、これらを用いて触覚を検出・記録・伝送・再生する技術を社会実証し、様々な展示会などを通して社会へ触覚機能の有用性と可能性を発信するとともに、身体性メディアコンソーシアムやオープンイノベーション拠点を立ち上げ研究会や共同研究などを通じて人材育成や事業化への橋渡しを進めてきた。

触覚コンテンツ技術及びテレイグジスタンス技術の実証においては、触覚機能を実装し人の様々な行動や感覚を相互伝送する技術を実証した。さらに XPRIZE 財団が主催する国際賞金レースのテーマ選定競技会の中でテレイグジスタンス技術のデモを実施、未来への可能性を発信したことで 2018 年の賞金レースのテーマに選ばれるなどテレイグジスタンス技術開発を世界的潮流へと高めた。更に ACCEL 発のベンチャー「Telexistence inc.」を設立し社会実装への橋渡しを加速させるなどの成果を得ている。

3. TELESAR VI の概要

今回研究開発したテレイグジスタンスロボットシステムである TELESAR VI (Telexistence Surrogate Anthropomorphic Robot VI) は、前述の「身体性メディア」プロジェクトの身体性テレイグジスタンスプラットフォームとして、構築したアバターロボットシステムである。自分の分身(AVATAR)として、離れたところからでも、その場にいるように見て聞いて話して様々な所作ができる。

近年、遠隔コミュニケーション、災害救助、医療など様々な場面で遠隔操作ロボットが利用され始めているが、これらのロボットを操縦者の分身として自在かつ安全に扱うためには、ロボットがいる遠隔地に自身が存在しているかのような高い臨場感が不可欠である。第一著者は「テレイグジスタンス」という概念を 1980 年に提唱し、以来このような高臨場感伝達技術の研究開発を様々なプロジェク

トを立案し推進して進めてきた。前述のように、最近になって、世界的賞金レース ANA AVATAR XPRIZE が開始されテレイグジスタンスの実現に向けての競争が開始され、実用化への大きな流れが起きている。

今回研究開発した TELESAR VI は、AVATAR が XPRIZE のテーマとして選ばれるにあたり大きな原動力となった TELESAR V の後継のテレイグジスタンスプラットフォームにあたる。TELESAR VI の特徴の一つは、テレイグジスタンスロボットとしては世界に類いのない 67 自由度を実現したことにある。

身体がどの程度自由に動けるかの指標として、独立して制御できる関節の数を表す自由度 (DOF) が TELESAR V では、53 自由度であったが、TELESAR VI では、これを大幅に増加させ 67 自由度を達成した。これまでにも人体模型用としては 64 自由度や 114 自由度の人間型ロボットは存在したが、それらではテレイグジスタンスができない。TELESAR VI では、視聴覚の臨場感伝送と人間の 134 自由度の非拘束な計測を合わせて実現することで AVATAR ロボットの 67 自由度を制御して、テレイグジスタンスを可能とした。

67 自由度の内訳は、頭部 3 自由度、胴体 6 自由度、腕左右 7 自由度ずつ都合 14 自由度、脚部 6 自由度ずつ都合 12 自由度、さらに左右のハンドに 16 自由度ずつ都合 32 自由度となっている。人間の自由度により近づいたことで、人間らしい所作が自然に伝えられるようになり、また、意のままに動く足をもったことにより身体所有感が大幅に増大し、自分が新たなロボットの身体を持ったことがより体感できるようになっている。

図 2 に、TELESAR VI のシステムの構成を示す。本システムは、マスタースレーブシステムであり、視聴覚の情報を実時間に計測し伝送して人に提示する「視聴覚情報系」、人の動作を実時間で計測し、それを伝送してロボットの動作を人に追従するよう制御を行う「動作計測制御系」、触覚情報を実時間で計測し、伝送して人に提示する「触覚情報系」からなる。なお、TELESAR VI は基本的には臨場感を重視したテレイグジスタンスシステムで、相互テレイグジスタンスの構成は取っていない。

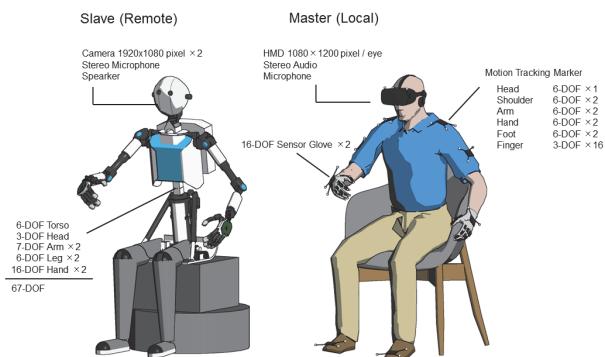


図 2 TELESAR VI のシステム構成

Fig. 2 System Diagram of TELESAR VI

図 3 に、TELESAR VI スレーブロボットの概観を示す。TELESAR VI スレーブは、両眼に当たる人間の眼間距離相当離して配置されたハイビジョンステレオカメラ、両耳に当たるマイクロフォン、及び、口に当たるスピーカーからなる頭部を 3 自由度の首で支えている。それに加えて、背骨 3 自由度と腰 3 自由度の動きにも対応する。なお、視覚系の設計は、文献[17]の方法によっている。

7 自由度からなる腕を 2 対有し、左右の手は、加速度、3 軸の力、温度センサを配した 16 自由度の手指を持っている。手指の自由度は、親指 5 自由度（根元回転、根元開閉、中節回転、中節開閉、末節開閉）、人差し指 及び中指 3 自由度（根元開閉、中節開閉、末節開閉）、薬指及び小指 2 自由度ずつ（中節開閉、末節開閉）に加え、アブダクションの 1 自由度を有する[18]。



図 3 TELESAR VI AVATAR ロボット

Fig. 3 TELESAR VI Avatar Robot

一方、TELESAR VI マスターの運動計測システムとして、Opti Track 及び Cobra Glove を使用している。頭部位置姿勢 6 自由度、肩位置姿勢 6 自由度 × 2、肘位置姿勢 6 自由度 × 2、手先位置姿勢 6 自由度 × 2、手指 16 自由度（親指 4 自由度、その他の指 2 自由度）× 2 の計測機能を有する。

オペレータの手指の情報を計測するためのグローブを、Synertial 社の IGS Cobra Glove をベースに構築した。グローブの甲側表面にマジックテープで貼り付けた 16 個の慣性センサから計測された情報から、指節と指全体の姿勢を推定する。慣性センサは 15mm × 10mm × 2mm の大きさであり、内蔵されたジャイロ計・加速度計・地磁気計の情報からセンサの 3 次元の姿勢情報（クオータニオン値）を出力する。各センサの配置は、手甲部に 1 個、末節骨に 4 個、中節骨に 4 個、基節骨に 5 個、中手骨に 2 個である。これらの 16 個の慣性センサによって、提示グローブを装着したユーザーの手指骨姿勢をサンプリング周波数 60Hz で計測する。慣性センサで取得した手指骨の姿勢情報から、

逆運動学に基づく姿勢推定手法を用いて各指間の関節角度を推定する。

しかし、上記の演算には、人の指の長さの推定値が必要である。一方、後述する新しい制御手法によれば、必要な情報は、各指の関節角ではなく、母指に対向する各指までの指間ベクトルであるため、直接、指先の位置を計測すればよい。そこで、OptiTrack のアクティブマーカーを指先に配置して指先間のベクトルを実時間推定できるようにした。グローブの指先にアクティブマーカーを付加する形で使用することで、オペレータの指の長さの推定も可能なため、あらかじめ指のマーカーが見える状態で指の長さを推定する。その後で、アクティブマーカーが、作業動作によって視認できなくなっていても、ジャイロ計・加速度計・地磁気計の情報から指先間ベクトルが推定可能なロバストなシステムが構築できた。

また、ハンドの制御において、従来の角度のみを伝える方法では人間の手とロボットのハンドの形は似るもの、指先の間隔がずれてしまい作業に支障がでる場合が多くあった。一般的に、人間の指とロボットハンドが、同一構造で同一の大きさで無い限り全く同じ動きはできない。しかし、スレーブロボットハンドを、操作する人ごとに替えることも実用上不可能である。

そこで、スレーブロボットを使って人間の行う手作業を自分の手で作業しているような感覚で行うという観点から、作業に関連する指先の相対的な関係のみを人間とロボットで一致させることで、この問題を解決した。具体的には、本手法では手のローカル座標系における母指の相対位置（オフセットをつけることも可能）及び、母指に対向する各指までの指間ベクトルをマスタースレーブ間で一致させるよう制御する。

図4にマスタースレーブシステムの概観を示す。このマスタースレーブ制御の詳細は、第97報[19]にて報告する。

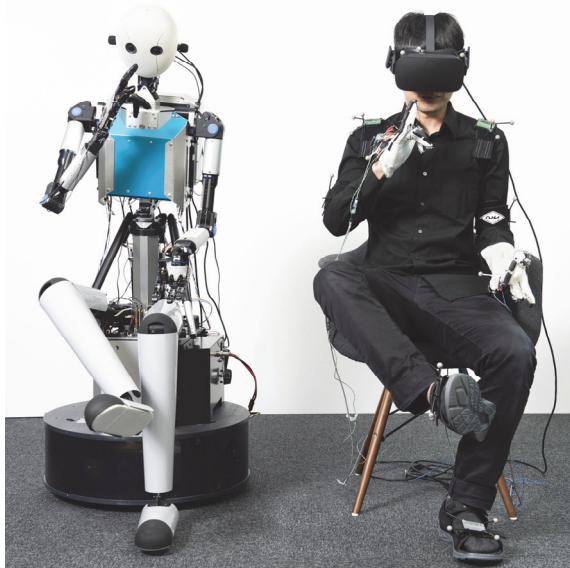


図 4 TELESAR VI のマスタースレーブシステム

Fig. 4 TELESAR VI Master Slave System

4. 触原色原理[20]

人が任意の物体を指の表面で直接触った時の感覚を伝えるために、人間の指の表面に、実際の物体と全く同じ物体を提示しなければならないのであれば、触覚を情報メディアとして扱うことはできない。視覚の場合には、物体の色が実際のスペクトルと異なっていても、人間のRGBのそれぞれを担う錐体細胞が同一の発火をすれば同じ色に見え、この原理こそが、テレビやカラー写真やカラーの印刷物を可能としている。それが、色の三原色原理である。同じことが触覚でも成り立つということ、つまり触原色というものが存在するというのが触原色原理である。

その存在を裏付ける事実が、人間の触覚において明確に異なる種類の感覚器が存在していることにある。メルケル細胞、マイスナー小体、パチニ小体やルフィニ終末がそれにあたり、また、温冷痛に反応する自由神経終末も存在する。神経生理学研究の成果として、メルケル細胞とルフィニ終末は圧力と剪断力、マイスナー小体は低周波振動、パチニ小体は高周波振動を検知することが知られている。また、物体に接触した際には、メルケルとルフィニで変位、マイスナーで速度、パチニで加速度を検知しているといわれている。

実物体には、凹凸形状、摩擦、熱、弾性といった多くの物理特性がある。これを、すべて再現する必要があれば、実物をもってこなければならなくなり、情報メディアとしての提示は不可能である。しかし、皮膚感覚が生じる状況を考察するならば、物体を触ると皮膚表面に、力と振動と温度変化が生じ、それが伝わって、これらの感覚器が反応して触覚が生じることがわかる。そうであれば、物体の凹凸形状、摩擦、熱、弾性といった物理特性がどうであれ、感覚器が、その物体を触った時と同一に反応すれば同じ触覚が人間に生じることになる。

従って、視覚のRGBを基底とする方法と等価な方法で、物理空間で基底を選択することで触原色が決定できる。メルケル細胞とルフィニ終末が圧力と剪断力、マイスナー小体が低周波振動、パチニ小体が高周波振動、自由神経終末は、温、冷、痛に応答することから、実物体を触ったときの人間の皮膚表面での、圧力と剪断力、すなわちベクトル力としての「力」、低周波から高周波までの「振動」と、「温度」が、実際に触っていないときでも、同一に提示されれば、人間は、同じ感覚を得ることになる。これが、人間の能動的な運動により、変化して行くが、それを人間の動きに追従して忠実に再現すればよいことになる。

これは、視覚において、光のすべてのスペクトラムを再現せず、RGBに対応したスペクトラムのみを基底として用い、その基底に基づく合成で、ほとんどすべての視覚情報を再現している方式と類似の方式である。

すなわち、物体の有する凹凸形状、摩擦、熱、弾性といった物理特性をすべて再現するのではなく、その物体との接触によって皮膚表面に生じる、「力」、「振動」、「温度」の三つの物理量を基底として、それらの時間変化を記録し、

伝送して、それらの基底を基に様々な触感を合成する。図5は、触原色原理を、物理空間、生理空間、心理空間のそれぞれにおける基底との関係で示している。

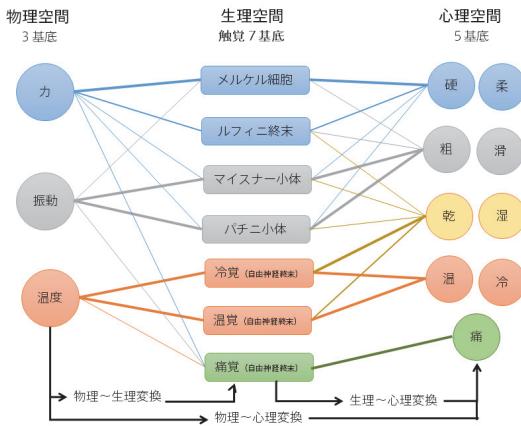


図 5 触原色原理

Fig. 5 Principle of Haptic Primary Colors

対象物は、凹凸形状、表面あらさ、摩擦、熱伝導率、粘性、弾性、慣性、湿潤などの物理特性を持っている。しかし、人間の皮膚感覚器が閲知するのは、基本的に、人間が対象物を自分の手などを動かすことにより対処物と触れて、その時生じる手などに生じる力(皮膚の変形)、振動、温度変化である、これにより触感を得ている。従って、最適な、センサとしては、それらを直接的にセンシングする力センサ、振動センサ、温度センサであり、それらを伝送して、力ディスプレイ、振動ディスプレイ、温度ディスプレイで人間に提示する。図6に触原色原理に基づく計測、伝送、提示の構成図を示す。

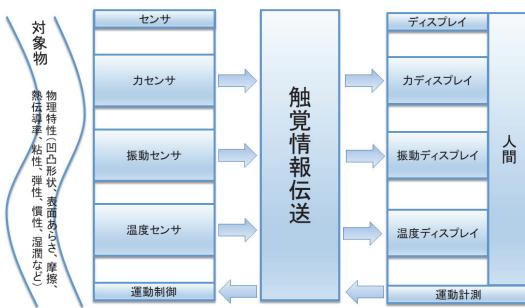


図 6 触覚情報の計測・伝送・提示

Fig. 6 Haptic Sensing, Transmission, and Display

5. 触原色原理に基づく触覚伝送システム

TELESAR VI では、10本の指先すべてに、力センサ、加速度センサ、温度センサを埋め込んでいる。加速度センサ情報を処理することで振動情報を得る仕組みになっている。これらの情報を指先で束ね、処理コンピュータに送るための指先センサ部では、加速度センサからの信号は I2C で受け、サーミスタ出力を AD 変換して、I2C に加え、力セ

ンサからのアナログ信号を含め、指の運動に馴染むよう 16 本の線を束ねたハーネスで触覚伝送基板(身体性伝送ロボットハンドむけ触覚制御基板)に伝える。左右それぞれの基板は、3軸の加速度センサ情報を 5本指分について、並列に 1kHz 以上で取得可能で、3軸の力センサ情報を 5本指分についても、並列に 1kHz 以上で取得可能であり、温度センサ情報は、5本指分について、並列に 50Hz 程度で取得可能、さらに、大きさが人間の手の甲と同等、すなわち高さ 800mm 程度以下、幅 700mm 程度以下、厚み 50mm 程度である。センシング結果が即時に伝送でき Ethernet 接続により本体のコンピュータにデータを送ることができる。図7に、指先センサと触覚伝送基板を配したロボットハンドの概観を示す。

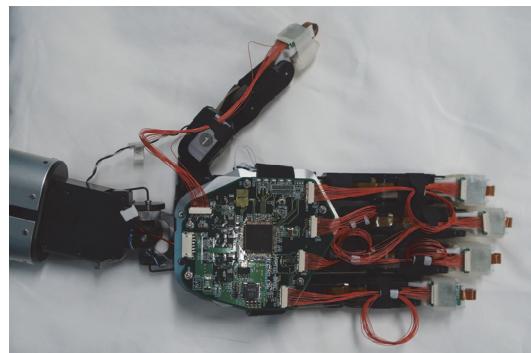


図 7 触覚センサと伝送基板を配したハンド

Fig. 7 Hand with haptic sensors

一方、触覚の提示システムとしては、各指に、ACCEL 身体性メディアプロジェクトで研究開発した振動と温度を提示する 2 原触素子[16]と新たに研究開発した力提示デバイスを配置して提示している。

力提示デバイスは、指パッド、糸、糸通しと小型モーターで構成されている。指パッドはモーターの力で引っ張られ、最初に指を変形させ皮膚感覚による力感覚が生じる。さらに大きな力で引かれると指関節に力がかかり関節包などの固有受容器による力感覚が生じる[21]。

この触覚伝送提示システムの詳細は、この報告に続く第98報[22]及び第99報[23]で報告する。

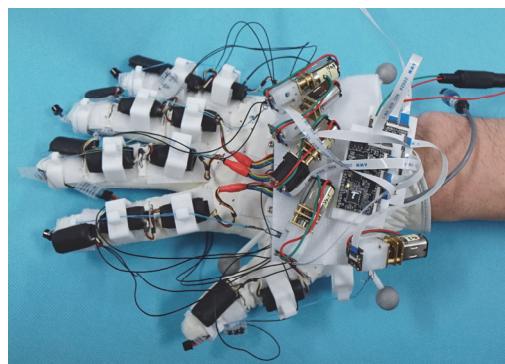


図 8 触原色を提示するマスター グローブ

Fig. 8 Master Glove displaying Haptic Prime Colors

6. おわりに

本稿では、テレイグジスタンス AVATAR システム TELESAR VI の概要について、JST ACCEL プロジェクト「身体性メディア」との関連も含め報告した。TELESAR VI は、AVATAR としては世界に類いのない 67 自由度を有するテレイグジスタンスロボットであり、10 指のすべてに力、振動、温度のセンサを有しており、この AVATAR ロボットを自分の新しい身体として、その場にいるような遠隔臨場感を実現できる。また、親指と他の指の間のベクトルをマスターとスレーブで一致させる新しい制御を実現している。

今後は、遠隔コミュニケーション、旅行やショッピングなどの遠隔体験、極限環境下における作業、遠隔医療、サービス産業、エンターテイメント分野にとどまらず、身体動作を伴う遠隔就労への適用などさまざまな応用が期待される。

謝辞：本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業（ACCEL）「触原色に立脚した身体性メディア技術の基盤構築と応用展開」の支援のもとに行われた。

参考文献

- [1] S.Tachi: Telexistence, World Scientific, ISBN-13 978-981-283-633-5 , 2010.
- [2] Adrian Stoică: Susumu Tachi -The Scientist who Invented Telexistence, ACM Crossroads, vol.22, no.1, pp.61-62, 2015.
- [3] 館暲, 谷江和雄, 小森谷清: 感覚情報呈示機能をもったマニピュレータの操縦方法, 特許第 1458263 号.
- [4] 館暲, 阿部稔: テレイグジスタンスの研究 第 1 報, 第 21 回計測自動制御学会予稿集, pp.167-168, 1982.
- [5] S.Tachi, K.Tanie, K.Komoriya and M.Kaneko: Tele-Existence (I), Proceedings of the 5th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (RoManSy'84), pp.245-254, Udine, Italy, 1984.
- [6] S.Tachi, H.Arai, I.Morimoto and G.Seet: Feasibility Experiments on a Mobile Tele-existence System, Proceedings of The International Symposium and Exposition on Robots, pp. 625-636, Sydney, Australia , 1988.
- [7] S.Tachi and K.Yasuda: Evaluation Experiments of a Teleexistence Manipulation System, Presence, Vol.3, No.1, pp.35-44, 1994.
- [8] S.Tachi, K.Komoriya, K.Sawada, T.Nishiyama, T.Itoko, M.Kobayashi and K.Inoue: Telexistence Cockpit for Humanoid Robot Control, Advanced Robotics, Vol.17, No. 3, pp. 199-217, 2003.
- [9] S.Tachi: Augmented Telexistence, Mixed Reality -Merging Real and Virtual Worlds, pp. 251-260, 1999.
- [10] S.Tachi, N.Kawakami, M.Inami and Y.Zaitsev: Mutual Telexistence System Using Retro-reflective Projection Technology, International Journal of Humanoid Robotics, Vol.1, No.1, pp.45-64, 2004.
- [11] S.Tachi, N.Kawakami, H.Nii, K.Watanabe and K. Minamizawa: 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.
- [12] K.Watanabe, S.Tachi: Verification of Out of Body Sensations, Attribution and Localization by Interaction with Oneself, in Proc. of IEEE International Symposium on Virtual Reality Innovations (ISVRI 2011), pp. 111-118, Singapore, 2011.
- [13] S.Tachi: TWISTER: Immersive Omnidirectional Autostereoscopic 3D Booth for Mutual Telexistence, Proceedings of ASIAGRAPH 2007, vol.1, no.2, pp.1-6, Tokyo, Japan, 2007.
- [14] 館暲, 渡邊孝一, 竹下佳佑, 南澤孝太, 吉田匠, 佐藤克成: 再帰性投影技術と全周囲裸眼 3D ディスプレイを用いて存在感と臨場感を実現する相互テレイグジスタンスシステム:TELESAR4, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.17, No.1, pp.11-21, 2012.
- [15] S.Tachi, K.Minamizawa, M.Furukawa and C.L. Fernando: Telexistence - from 1980 to 2012, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012), pp.5440-5441, Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012.
- [16] https://tachilab.org/jp/accel_project.html
- [17] 館暲, 荒井裕彦: テレイグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.4, pp.314-326, 1989.
- [18] 井上康之, 加藤史洋, 館暲: テレイグジスタンスの研究(第 97 報) — 5 指ロボットハンドとレッグ機構を含む 67 自由度テレイグジスタンスロボットの全身マスタースレーブ制御 —, 日本バーチャルリアリティ学会第 15 回テレイグジスタンス研究会研究報告(ISSN 1343-0572), Vol.25, No. TX01, pp.7-10, 2020.
- [19] <https://tachilab.org/jp/about/hpc.html>
- [20] S.Tachi: Forty Years of Telexistence - From Concept to TELESAR VI, Proceedings of the International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments (ICAT-EGVE2019), pp 1-8, Tokyo, Japan, 2019.
- [21] F.Kato, Y.Inoue and S.Tachi: Haptic Display Glove Capable of Force/Vibration/Temperature, The 22nd International Symposium on Measurement and Control in Robotics(ISMCR-2019), Houston, USA, 2019.
- [22] 加藤史洋, 井上康之, 館暲: テレイグジスタンスの研究(第 98 報) — TELESAR VI ハンド指先のための力・加速度・温度センシングシステムの開発 —, 日本バーチャルリアリティ学会第 15 回テレイグジスタンス研究会研究報告(ISSN 1343-0572), Vol.25, No. TX01, pp.11-14, 2020.
- [23] 加藤史洋, 井上康之, 館暲: テレイグジスタンスの研究(第 99 報) — TELESAR VI のための力提示マスターグローブの提案 —, 日本バーチャルリアリティ学会第 15 回テレイグジスタンス研究会研究報告(ISSN 1343-0572), Vol.25, No. TX01, pp.15-18, 2020.