

日本バーチャルリアリティ学会研究報告

The 15th Workshop on Telexistence

第 15 回テレイグジスタンス研究会

2020年2月14日

日本バーチャルリアリティ学会

日本バーチャルリアリティ学会研究報告目次

CONTENTS

第 15 回テレグジスタンス研究会／The 15th Workshop on Telexistence

〔主催：テレグジスタンス研究委員会〕
〔Organized by Special Interest Group on Telexistence〕

2020年2月14日（金）14:00－17:00（東京大学）

TX01-1	テレグジスタンスの研究（第 96 報）—TELESAR VI : 67 自由度 を有するテレグジスタンス AVATAR システム— 舘 暲, 井上 康之, 加藤 史洋（東京大学）, Charith Fernando, MHD Yamen Saraiji(慶應義塾大学)…………… 1
TX01-2	テレ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 自由度テレグジスタンスロボットの全身マス タースレーブ制御— 井上 康之, 加藤 史洋, 舘 暲（東京大学）…………… 7
TX01-3	テレ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— 加藤 史洋, 井上 康之, 舘 暲（東京大学）…………… 11
TX01-4	テレ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— 加藤 史洋, 井上 康之, 舘 暲（東京大学）…………… 15
TX01-5	Study on Telexistence C: A Telediagnosis Platform based on Telexistence: Investigation of the Roles of Presence and Tactile Information in Telemedicine Junkai Fu, Fumihiro Kato, Yasuyuki Inoue, Susumu Tachi (The University of Tokyo)…………… 19
TX01-6	Fusion: Wearable Telexistence System for Body Sharing and Mutual Collaboration MHD Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Kouta Minamizawa, (Keio University), Masahiko Inami(The University of Tokyo)…23

テレグジスタンスの研究 (第 96 報)

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

Study on Telexistence XCVI
- TELESAR VI : Telexistence Avatar System with 67 DOF -

舘 暲¹⁾, 井上康之¹⁾, 加藤史洋¹⁾, Charith Fernando²⁾, Yamen Saraiji²⁾

Susumu TACHI, Yasuyuki INOUE, Fumihiko 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, fumihiko.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 (TELExistence 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], 移動型テレグジスタンスシステム[6], 人間型テレ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事ができ, 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].

視覚と聴覚に関してのテレグジスタンスの実現可能性と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して, その実現可能性と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, 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プティックテレ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。

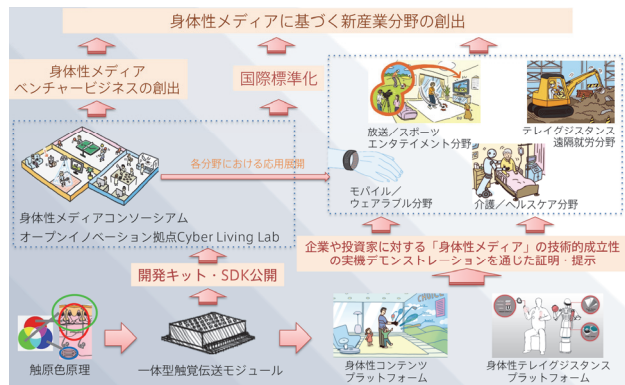


図 1 「身体性メディア」プロジェクトの概略

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、ウェ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し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グジスタンスシステムで、相互テレグジスタンスの構成は取っていない。

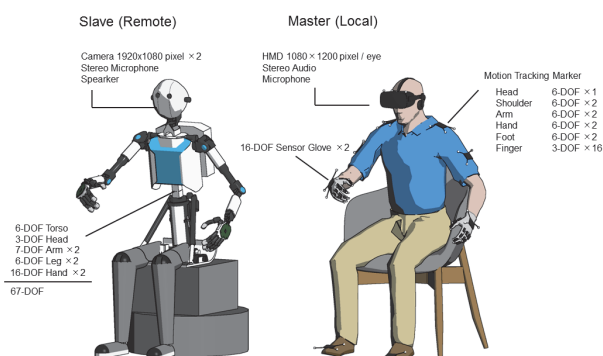


図 2 TELESAR VI のシステム構成
Fig. 2 System Diagram of TELESAR VI

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、口にあたるスピーカからなる頭部を 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]。

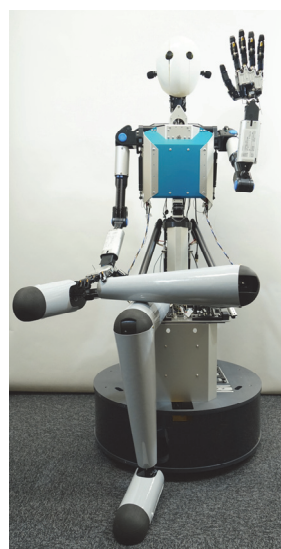


図 3 TELESAR VI AVATAR ロボット
Fig. 3 TELESAR VI Avatar Robot

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 (クォータニオン値) 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、アクティブマーカが、作業動作によって視認できなくなっても、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々あった。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。

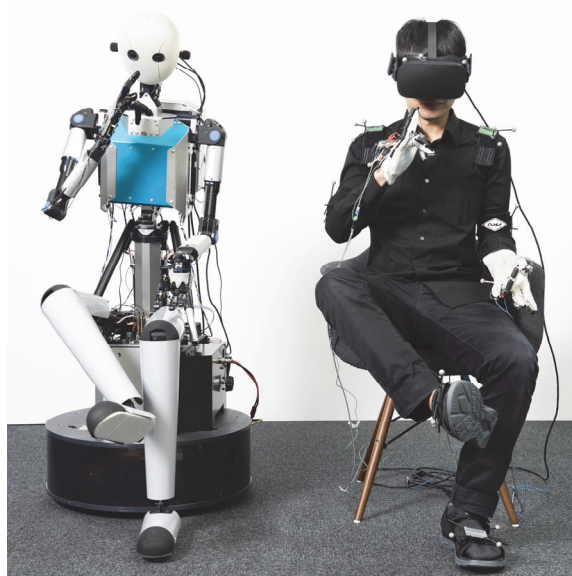


図 4 TELESAR VI のマスタースレーブシステム
Fig.4 TELESAR VI Master Slave System

4. 触原色原理[20]

人間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るとしても、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るれば、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、痛に反応することから、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．

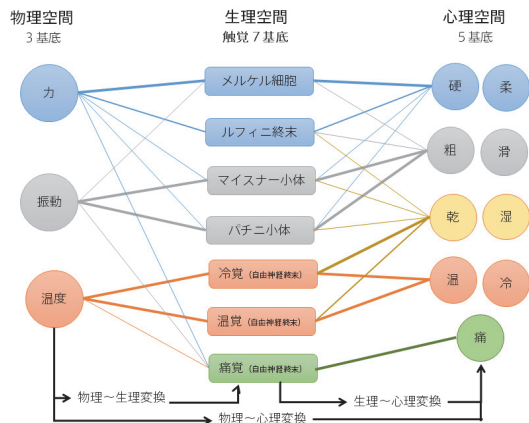


図 5 触原色原理

Fig.5 Principle of Haptic Primary Colors

対象物は、凹凸形状、表面あらし、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関知するのは、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．

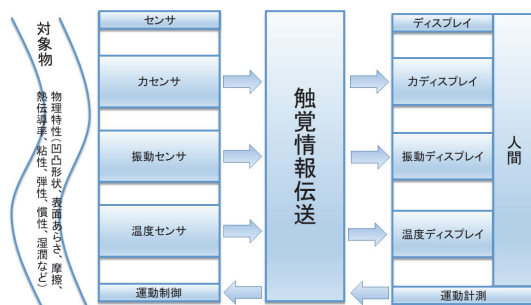


図 6 触覚情報の計測・伝送・提示

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ある．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．

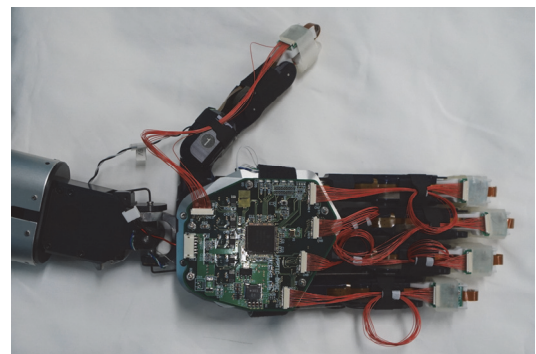


図 7 触覚センサと伝送基板を配したハンド

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で構成されている．指パッドはモータの力で引っ張られ、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．

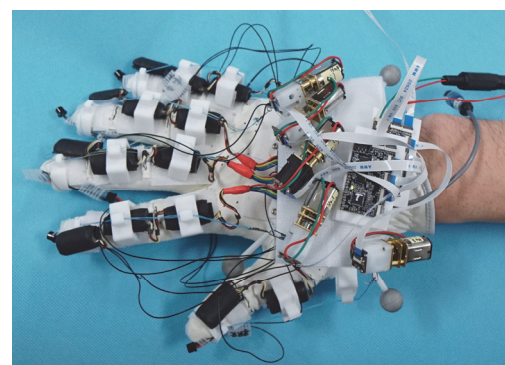


図 8 触原色を提示するマスターグローブ

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、エンターテイン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 Scoică: Susumu Tachi -The Scientist who Invented Telexistence, ACM Crossroads, vol.22, no.1, pp.61-62, 2015.
- [3] 舘 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] 舘 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 Telexistence 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.Zaitzu: 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] 舘 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] 舘 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, 舘 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一, 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, 舘 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一, 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, 舘 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一, 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.

テレ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 自由度テレグジスタンスロボットの全身マスタースレーブ制御—

Study on Telexistence XCVII: Full-body Master-slave Control of 67DoF Telexistence Robot including Five-finger Robot Hand and Leg Mechanism

井上康之¹⁾, 加藤史洋¹⁾, 舘璋¹⁾

Yasuyuki INOUE, Fumihiro KATO and Susumu TACHI

1) 東京大学 高齢社会総合研究機構

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, y-inoue@tachilab.org)

Abstract: A telexistence robot which has human-resemble body structure and works under master-slave control can reproduce human's complex body movements for performing many kinds of teleoperation like a real human. In this paper, a full-body robot control system for the latest model of the telexistence robot "TELESAR VI" is shown. One of the main features of this robot control system is that the five-finger robot hand is precisely controlled by using newly developed finger measurement system. Also, this control system manages a pair of 6-DoF leg mechanism which can copy the leg posture of the robot's operator sitting on a chair. Owing to these features, the operator can achieve fine manual operation as if the robot hand were own, and the appearance of robot's body such as arms, hands and legs synchronizing with own body is expected to bring whole-body transfer of bodily consciousness.

Key Words: Telexistence, robot hand, master-slave control, presice hand manipulation

1. はじめに

テレグジスタンスは人が今いる場所とは異なる別の空間に実際に存在しているような体験を生じさせる技術を指す概念である[1]. テレグジスタンスを実現させることを目的として, 人間と同等な運動機能や感覚機能を備えた人型代理ロボット TELESAR (Telexistence Surrogate Athropomorphic Robot) がこれまで開発されてきた[2-4]. その最新型となるテレグジスタンスロボット TELESAR VI は JST-ACCEL 身体性メディアプロジェクト[5]によって開発された. TELESAR VI の特徴として, 従来のテレグジスタンスロボット (TELESAR V[4]) の 52 自由度よりも多い 67 自由度の機構を有して操縦者の頭や腕・手指の動きに加えて脚の動きまでを再現することが可能であること, また, 触原色原理に基づく触覚センシング/提示システムを備えてロボットハンドで触れた触感を伝送・再現できることなどがある[6]. 本稿では, TELESAR VI の 67 自由度に関する全身マスタースレーブ制御について述べる.

2. 関連研究

従来の TELESAR V に関するマスタースレーブシステム

[4]は, 操縦者の身体運動を光学式モーションキャプチャと曲げ感知式センサグループで計測し, その計測データに基づいてロボットのトルソ (5 自由度)・ヘッド (3 自由度)・アーム (7 自由度×2)・ハンド (15 自由度×2) の各関節を制御することで, ロボットに操縦者と同じ身体運動をリアルタイムで再現させるものであった. 特に, 頭部の視点 (目/カメラ) と腕の終端部 (手甲部) については, その 3 次元的位置と姿勢に関する 6 自由度をマスタースレーブ間で正確に一致させるための逆運動学が解かれている. これによってロボットに搭載されたステレオカメラ映像が操縦者の頭部運動に合わせて変化し, その映像を HMD などを通じて操縦者に提示することで, 操縦者の網膜上にロボットの視界が投影されることになる. さらに, 操縦者が操作するロボットハンドの空間座標は, 奥行方向も含めて操縦者が自分自身の手を見た時の場所と正確に一致する. これによって操縦者の身体に対する視覚情報と固有感覚情報が整合し, ロボットに対する強い没入感覚をもたらす.

しかし, TELESAR V のロボットハンド制御は, マスター側の計測システムの制約から指先の位置や姿勢に関する

厳密な逆運動学が解かれておらず、代わりに、特定の手指姿勢をマスタースレーブ間で一致させるアドホックな調整[7]が適用されていた。そのため、ロボットハンドで再現された指の動きの正確性が担保されるのは限定的な範囲に留まる。また、TELESAR Vは円筒状の下半身が台座に固定される形であり、人間の下肢に相当するレッグ機構は備わっていない。そのため、トレイグジスタンス中の操縦者が下を向くと自らの足が存在しないように見えてしまい、全身的な没入感覚の維持が妨げられる。

これに対して、TELESAR VIでは操縦者の計測システムとロボットのメカニズムを改良し、これらの問題を解決した。具体的には、新規に開発された複合式センサグローブと16自由度ロボットハンドを用いることで、操縦者が行う手指運動のより厳密なマスタースレーブ制御が実現された。また、ロボットの下半身には6自由度レッグ機構を左右に搭載することで、操縦者の座位姿勢での両脚の動きが再現される。このレッグ機構の存在は、ロボットに対する操縦者の自己投射性を強めるだけでなく、代理ロボットの動きを通して伝わる操縦者の存在感も強化するため、ロボットを用いた身体性コミュニケーションに貢献することが期待される。次節では、TELESAR Vに対するこれらの改良点も含めて、全身マスタースレーブ制御システムの詳細を述べていく。

3. 操縦者の身体運動計測システム

3.1 光学式モーションキャプチャ

TELESAR Vの計測システムと同様、操縦者の大きな身体運動は光学式モーションキャプチャ（Acuity inc, OptiTrack, Prime 13/13W）で計測する。以前のシステムでは再帰性反射マーカの取付部位が頭部・両肩・両手首の5箇所だったのに対して、本システムでは更に左右の上腕と足先にもマーカを配置して、合計9箇所の身体部位の3次元的位置と姿勢を最大240Hzで計測する。この計測で得られた54自由度のデータを利用して、4節で述べるTELESAR VIの胴体（6自由度）・頭部（3自由度）・アーム（7自由度）×2およびレッグ（6自由度×2）の制御を行う。さらに、操縦者が両手に装着したグローブの先端には赤外LEDマーカが取り付けられており、左右合わせて10本の指先位置の動きを時分割によって最大30Hzで計測し、後述する慣性式センサグローブと組み合わせて操縦者の手指運動計測に利用する。

3.2 慣性式センサグローブ

TELESAR Vで操縦者の手指運動の計測システムに用いられた曲げ感知式センサグローブ（5DT, 5DT-14）は、各指節の間の平面的な屈曲角度は計測できるが3次元的位置や方向や位置を計測できず、ロボットハンド制御において指先に関する逆運動学が解けない課題があった。これに対してTELESAR VIの計測システムは慣性式センサグローブ（AiQ Synertial Ltd, IGS-CobraGlove16）を採用し、更にモーションキャプチャによる位置計測と組み合わせることで指先の位置と姿勢を30Hzで計測可能な複合センサ

グローブ（図1）を開発することでこの問題を解決した。この複合センサグローブは、2種類のセンサ情報を相互に利用した計算モデルを用いることで手指運動の計測精度と安定性の両方が確保されている[8]。この計測システムを通して得られた60自由度のデータを利用して、4節で述べるTELESAR VIのロボットハンド（16自由度×2）の制御を行う。

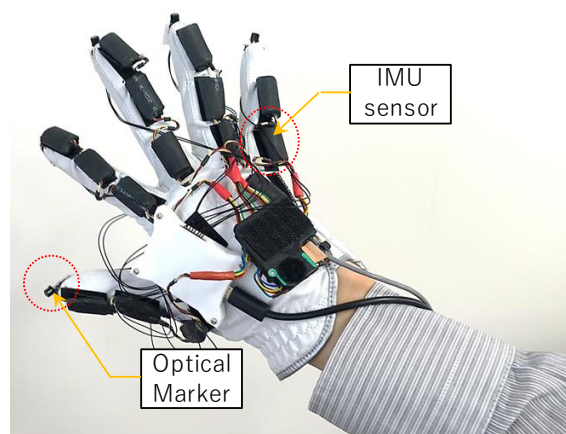


図1 手指運動計測用複合センサグローブ

4. TELESAR VIの運動制御システム

4.1 ロボットメカニズムの仕様

TELESAR VIの全身のメカニズムは、6自由度トルソと3自由度ヘッドから成る本体部（川渕機械技術研究所, UHB_01）と、その両肩に取り付けた7自由度アーム×2（川渕機械技術研究所, UHA_02）、腰部底板に取り付けた6自由度レッグ×2（川渕機械技術研究所, AHS_01）、さらに、左右のアーム先端に取り付けた16自由度ハンド×2（川渕機械技術研究所, Universal_Hand_05）という要素で構成される（図2, 3）。各関節には高出力のDCマイクロモータ（FAULHABER Drive Systems）が搭載され、人体の複雑な身体動作を再現するのに十分な広い可動範囲を持つ（表1-4）。

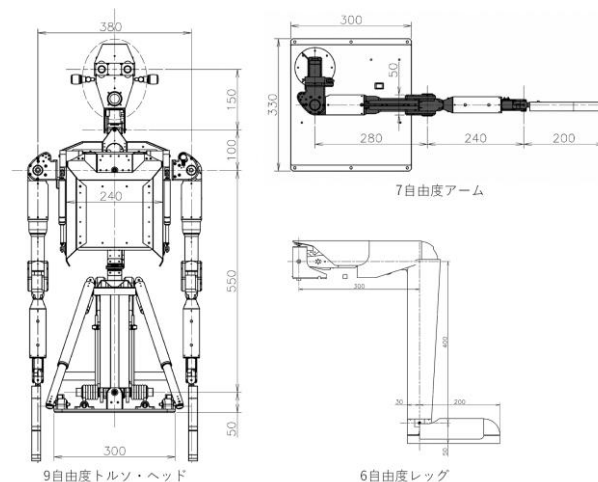


図2 TELESAR VIの外形寸法（ボディ）

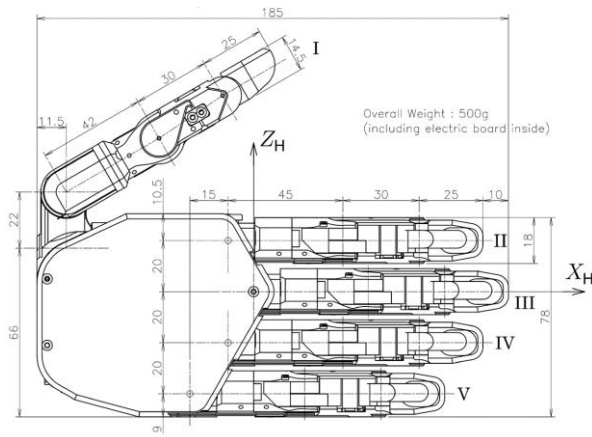


図3 TELESAR VI の外形寸法（ハンド）

表1 TELESAR VI ボディ関節の可動性

	有用可動範囲	可動部位	可動方向
JB1	-18° ~ +18°	腰3軸回転	X軸
JB2	-10° ~ +35°		Y軸
JB3	-90° ~ +90°		Z軸
JB4	0mm ~ +100mm	脊柱1軸並進	Z軸
JB5	-26° ~ +8°	胸2軸回転	Y軸
JB6	-16° ~ +16°		X軸
JH1	-30° ~ +30°	首3軸回転	X軸
JH2	-30° ~ +45°		Y軸
JH3	-60° ~ +60°		Z軸

表2 TELESAR VI アーム関節の可動性

	有用可動範囲	可動部位	可動方向
JA1	-35° ~ +115°	肩3軸回転	Y軸
JA2	-100° ~ +15°		Z軸
JA3	-150° ~ +30°		X軸
JA4	-130° ~ 0°	肘1軸回転	Y軸
JA5	-90° ~ +90°	手首3軸回転	X軸
JA6	-12° ~ +42°		Y軸
JA7	-42° ~ +57°		Z軸

表3 TELESAR VI レッグ関節の可動性

	有用可動範囲	可動部位	可動方向
JL1	-8° ~ +8°	大腿3軸回転	Z軸
JL2	-25° ~ +5°		Y軸
JL3	-25° ~ +60°		X軸
JL4	0° ~ +115°	膝1軸回転	Y軸
JL5	-15° ~ +15°	足首2軸回転	X軸
JL6	-25° ~ +25°		Y軸

表4 TELESAR VI ハンド関節の可動性

	有用可動範囲	可動部位	可動方向
JT1	-120° ~ 0°	母指 基節3軸 回転	X軸
JT2	-60° ~ 0°		Y軸
JT3	0° ~ +45°		X軸
JT4	0° ~ +112°	中節1軸回転	Y軸
JT5	-30° ~ +80°	末節1軸回転	Y軸
JAb	0° ~ 15°	アブダクション	Y軸
JF1	0° ~ +78°	対向指 3リンク平面 回転	Z軸
JF2	0° ~ +112°		Z軸
JF3	-30° ~ +80°		Z軸

4.2 TELESAR VI のマスタースレーブ制御

トレイグジスタンスの実現において重要な点は、視点から指先や足先などの終端部位に向かうベクトルをマスタースレーブ間で一致させることであり、これは以下の2式の制約として表現される[4].

$${}^{sl_eye}wT = {}^{ms_eye}wT \quad (1)$$

$${}^{sl_eye}{}_{sl_endpoint}T = {}^{ms_eye}{}_{ms_endpoint}T \quad (2)$$

この2つの式が満たされることで、操縦者はあたかも自分の身体がロボットと重なっているような感覚を作り出し、操縦者自身の身体スキルを利用した直観的なマスタースレーブ操作が可能になる。TELESAR VI ではまず、(1)式に基づいてボディの制御を行う。計測された操縦者の頭部位置と姿勢（6自由度）および胸部姿勢（3自由度）を用いて(1)式を満足させる JB1~JB6 および JH1~JH3 の値を求める逆運動学を解く[9]。次に、(2)式に基づいてアームを制御する。計測された操縦者の手首位置と姿勢（6自由度）および上腕の方向（1自由度）を用いて(2)式を満足させる JA1~JA7 の値を求める逆運動学を解く[9]。なお、従来の TELESAR V では、手首以降の逆運動学が解かれていなかったのに対して、TELESAR VI では手指計測システムの更新とロボットハンドの自由度の増加（15→16）によって、ロボットハンドの5本の指すべてに対して可能な限りマスタースレーブ間で位置や姿勢を一致させる逆運動学を適用する。まず、ヒト側での可動範囲が最も広い親指は、それに対応するロボット側の自由度も多いため、計測された指先の位置（3自由度）と姿勢（3自由度）から(2)式をできるだけ満足させる JT1~JT5 の値を求める。その後、可動範囲が親指よりも広くない対向4指については、それに対応するロボット側の自由度も少ないため、姿勢に関する制御を妥協し、計測された指先位置（3自由度）から以下の(3)式を満足させる JF1~JF3 および JAb の値を求める[10].

$${}^{sl_thumb}p_{sl_finger} = {}^{ms_thumb}p_{ms_finger} \quad (3)$$

この制御の結果、指の各節の曲がり方はマスタースレーブ間で異なるが、その指先どうしの空間的な配置関係は両者で同一になり、人間の手指作業の遂行に重要な「摘まむ」指

の形がロボットハンドで再現されるようになる (図 4)。

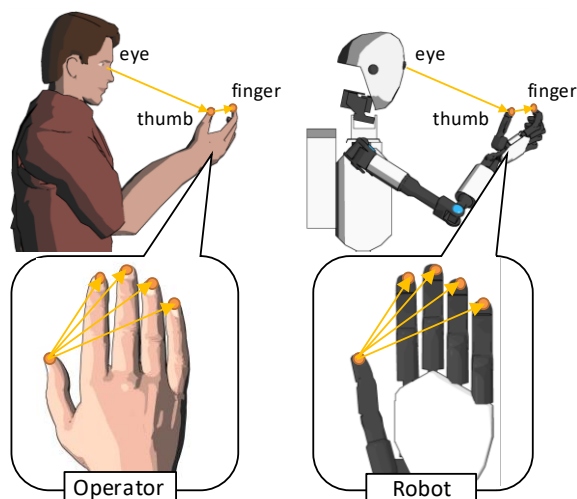


図 4 視点から母指・対向指に向かうベクトルの一致

また、レッグに関しては、アームの制御と同様、(2)式を満足させるように計測された操縦者の足首の位置・姿勢 (6 自由度) を用いて JL1~JL6 の値を求め、視点からのベクトルをマスタースレーブ間で一致させる制御を行う (図 5)。

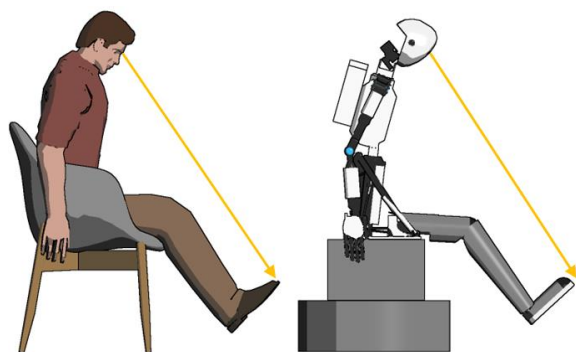


図 5 視点から足先に向かうベクトルの一致

5. まとめ

本稿では、新規に開発されたテレグジスタンスロボット TELESAR VI の合計 67 自由度を用いた全身マスタースレーブ制御の概要をまとめた。基本的な構成は従来までのシステムを踏襲しつつ、操縦者側の運動計測システムとロボット側のメカニズムを更新することによって、これまで困難であったロボットハンドの指先の正確な運動制御や、レッグ機構を用いたより人間らしい身体表現の再現が可能になった。

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」の支援によって行われた。

参考文献

- [1] S. Tachi, Telexistence (2nd Edition). World Scientific, 2015.
- [2] S. Tachi, H. Arai and T. Maeda, "Tel-existence master-slave system for remote manipulation", Proceedings of IROS '90. IEEE International Workshop, pp. 343-348, 1990.
- [3] S. Tachi, K. Watanabe, K. Takeshita and K. Minamizawa, "Mutual Telexistence Surrogate System: TELESAR4 - telexistence in real environments using autostereoscopic immersive display -", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 25 - 30, 2011.
- [4] C. L. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, S. Kamuro, K. Sato, K. Minamizawa and S. Tachi, "Design of TELESAR V for Transferring Bodily Consciousness in Telexistence", 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.5112 - 5118, 2012.
- [5] http://www.jst.go.jp/kisoken/accel/en/research_project/ongoing/h26_05.html
- [6] 舘 暲, 井上康之, 加藤史洋, C. L. Fernando, M. Y. Saraiji : テレグジスタンスの研究 (第 96 報) —TELESAR VI: 67 自由度を有するテレグジスタンス AVATAR システム—, 第 15 回テレグジスタンス研究会予稿集, pp. 1 - 6, 2020 年 2 月.
- [7] C. L. Fernando, M. Furukawa, K. Minamizawa, S. Tachi, "Experiencing ones own Hand in Telexistence Manipulation with a 15 DOF Anthropomorphic Robot Hand and a Flexible Master Glove", Proceedings of the 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), pp.20 - 27, 2013.
- [8] Y. Inoue, F. Kato, and S. Tachi, "Finger Motion Measurement System for Telexistence Hand Manipulation", Proceedings of the 22nd International Symposium on Measurement and Control in Robotics(ISMCR-2019), 2019.
- [9] 井上康之, M. Y. Saraiji, C. L. Fernando, 加藤史洋, 山崎 喬輔, 田島優輝, 舘 暲 : テレグジスタンスの研究 (第 89 報) —テレグジスタンスのためのロボットシミュレーションシステム—, 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2017 年 9 月.
- [10] Y. Inoue, F. Kato, and S. Tachi, "Master-Slave Robot Hand Control Method based on Congruence of Vectors for Telexistence Hand Manipulation", Proceedings of the 22nd International Symposium on Measurement and Control in Robotics(ISMCR-2019), 2019.

テレ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—

Study on Telexistence XCVIII - Haptic Primary Colors Sensing System for TELESAR VI

加藤史洋¹⁾, 井上康之¹⁾, 舘暲¹⁾

Fumihito KATO, Yasuyuki INOUE, and Susumu TACHI

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, {fumihito.kato, y-inoue, tachi}@tachilab.org)

Abstract: We propose a tactile measurement system based on the tactile primaries (HPC) of TELESAR VI. We have developed a finger tactile sensor that incorporates sensors that measure three physical quantities: force, vibration, and temperature. We also developed five fingers for both hands. These tactile measurement data can be taken into the PC through the tactile mother board mounted on the back of the hand and transmitted to the master glove to display haptic. The fingertips consisted of a hard base bone such as the phalanx and a flexible surface material to make it easier to grasp the object, so that the master operator are able to respond to fine manual work.

Key Words: haptic primary colors, tactile, telexistence, humanoid robot

1. はじめに

テレグジスタンスによるロボットの操縦では触覚の把握が不可欠である。これまで TELESAR V[1] など触覚を搭載した人型ロボットが提案されている。

我々は、TELESAR の次世代機として TELESAR VI を開発している。従来は 3 本指の指先への触覚付与だったが、全 5 本指について触覚を付与したロボットハンドを開発した。力／振動／温度の触原色[2]からなる触覚取得システムを構成するために、力／加速度／温度センサをそなえた指先を提案する。本稿では開発した TELESAR VI の触覚ハンドについて報告する。

1.1 関連研究

指先型のプローブを用いて触覚情報を取得する手法が報告されている。加速度センサを埋め込んだ指先型プローブで材質表面をなぞることで、触覚信号の振動成分を特定する手法[3]や触覚計測向けの指先型センサデバイスである Biotac[4]をロボットの手の 2 指に取付けて、ロボットハンドによる絞りやつかみなどのジェスチャにより対象の材質を分類する手法[5]がある。

2. 触原色原理

ヒトの触覚特性と触原色原理について述べる。触覚は、体性感覚・内蔵感覚が感じる機械刺激の一種である[6]。体性感覚は皮膚で感じる表在性の皮膚感覚（触覚や温度感

覚）と骨格筋や腱、関節で感じる深部感覚とに分類される。皮膚の触や圧、筋肉の伸張や緊張など体に加えられた機械的刺激に応答する。触覚は、皮膚に加えられた適度の大きさの機械的刺激を受容する感覚である。触覚受容器は受容野の大小により刺激の境界を明瞭に感じたり、刺激の変化や変位に対応するよう役割分担される。遅順応（Slowly Adapting: SA）型と速順応（Rapidly Adapting: RA）型とに分けられる。I 型は受容野がごく小さいため境界が比較的鮮明であるのに対し、II 型は受容野が広いために境界不鮮明である。触覚受容器は 4 種、マイスナー小体（RAI）やメルケル触盤（SAI）、パチニ小体（RAII）やルフィニ終末（SAII）があり、皮膚の振動に最も反応するのは RAII で 100~300 Hz、RAI で 40 Hz 前後である。SA 型は変位にも反応するため力などの変位量にも発火しつづける。指先には RAI 型、SAI 型それぞれ 1 平方 cm あたり 140,70 個の密度で分布する。温覚受容器の神経発火しやすい温度は 40~45°C であり、冷覚受容器は 30°C である。深部感覚は位置覚、運動覚、力覚とに分けられる。力覚は固有受容器で皮膚の変形で捉えきれなかった大きな力を、抵抗に逆らって関節位置を保持するための筋力として推定する感覚である。

皮膚感覚の測定のために、ヒトの触覚や深部感覚と同等の情報を測定するには機械的な振動は 1 kHz ほどのサン

リングが必要で、ある程度の大きさの力も測定できる必要がある。

触原色原理とは、触刺激は触覚受容体別の刺激要素への分解が可能で、触情報の組み合わせにより再構成も可能とする理論[2] [7]を指す。光の三原色と同様のアナロジーである。ヒトの目では、光波長の吸収特性が異なる3種の錐体の応答の組み合わせから色の知覚が生じる。触原色原理では、触覚受容器と温度受容器に対応する振動、力、温度を対象の物理量と捉える。

本提案ではヒトの触覚が得るのと同等の高いサンプリングレートで力と振動と温度を同時に取得できる触覚センサシステムをそなえたロボットハンドを構築する。

3. TELESAR VI

我々の研究グループでは TELESAR V を改良した、全身 67 自由度の TLESAR VI を開発した。詳細はテレイグジスタンスの研究第 96, 97 報[8][9]を参照いただきたい。TELESAR VI は片手で 16 自由度を持つ。手の指先部に触覚を組み込み、マスタースレーブシステムでは触覚を計測し提示しながらの操作が可能となる。図 1 に手の構成を示す。

3.1 触覚計測システム

力、加速度、温度センサをそなえる触覚計測システムを構築し手の指先に装着した。図 2 に開発した触覚基板を示す。ベースとなる制御基板はロボットの手甲に搭載され、5 指の先端に配置する指先基板と接続される。

指先基板にはセンサ基板、力センサとが接続される(図 3)。センサ基板には加速度センサが搭載され、またサーミスタの抵抗値変動は ADC を介して接続され、各センサ・ADC は I2C 接続により、ベースとなる触覚基板と接続される。力の取得には piezo 抵抗型 3 軸力覚センサ μ DynPick MAF-3 (1kHz, ワコーテック社製)を用いて鉛直方向の力と水平 2 軸のモーメントの計 3 軸の力を取得する。加速度の取得には KX126-1063 (読出レート/重力加速度/量子化 bit は 1.6kHz / 2g / 12bit, 3 軸, Kionix / ROHM Semiconductor 社)を用いた。サーミスタ (56A1002-C3, Alpha Technics) は ADC (ADS1015, 4ch, 12bit, I2C 互換)を経由して、最大 6ch 接続可能な構成である。5 指の触覚センサが取得した信号は並列に取得可能である。得られた計測値は、ベース基板からネットワークを経由して PC に取り込まれ波形を可視化したり、マスターグローブに伝送して触覚提示[10]したりする。触覚情報取得の流れを図 4 に示す。また、センサが取得する触覚センサの波形例も図 4 内 (触信号の可視化) に示す。

3.2 指の構成

指先基板、センサ基板や触覚センサの指先への組み込みを実現するために、センサを組み込んだ指先を開発した。各指の第一関節にはめ込む末節骨様の指先ベース骨の上部(図 3 中の黄色いパーツ)には指先基板と力センサを固定する。中間レイヤー(図 3 中の灰色部)の上面には力センサーのアーム部のもう一方がネジで固定され、下面には

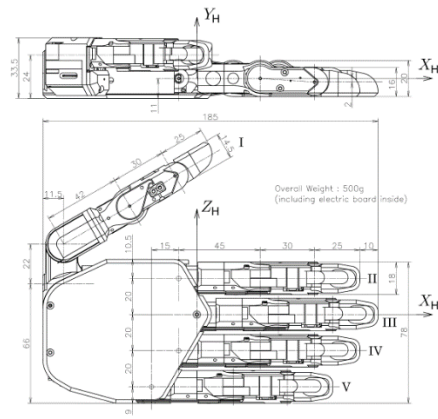


図 1 TELESAR VI 手の模式図 (16 自由度)

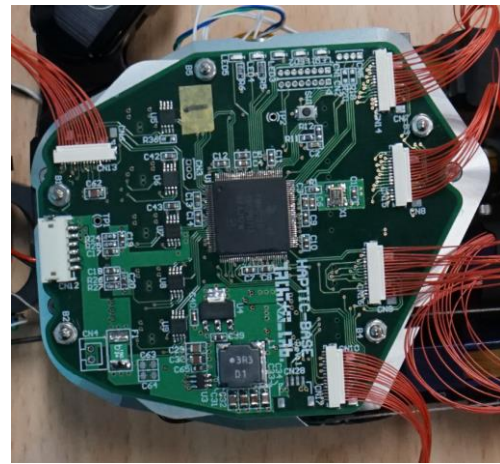


図 2 触覚ベース基板

指先センサ基板が配される。指先カバーの表面(底面)(図 3 の緑色領域)に固定するサーミスタからの配線が、指先センサ基板に接続される。サーミスタを配置するためのカバー穴を複数もうけてあり、指腹のどの位置が物体に触れているかは温度変動より検出可能である。サーミスタは厚み 0.01mm の高伸縮フィルム(厚み 0.01mm, モイストヒーリングパッド, 白十字社)で指先カバーに固定される。

サーミスタへ熱が素早く伝わるように、シリコン樹脂と酸化アルミニウム粉末を混合した人工皮膚を検討した。しかし、先述のフィルムよりも厚みがあり、また強い粘着性を抑えるため表面にタルク(粉末)をまぶす必要がある。ロボットの回路に粉末が散らばってしまうのを防ぐため、濡れた物体に触れるとタルクが流れてしまうため採用は見送った。調整した人工皮膚は、シリコン樹脂(人肌のゲル 硬度 7)と酸化アルミニウムの粉末を混合して固めたもので、厚みは 1mm ほどのシート状に整形した。熱伝導率はシリコン樹脂は $0.14[W/(m \cdot K)]$ ほどで酸化アルミニウムが $30[W/(m \cdot K)]$ であるため、調製した質量%濃度 20%の混合物は $6.1[W/(m \cdot K)]$ であると推算できる。成形した柔らかい樹脂を貼り付けることで柔らかい指先を損なわず、熱伝導率はヒトの皮膚(大部分を占めるタンパク質で 0.2, 水で 0.6)よりも十分に高い。試作してロボット

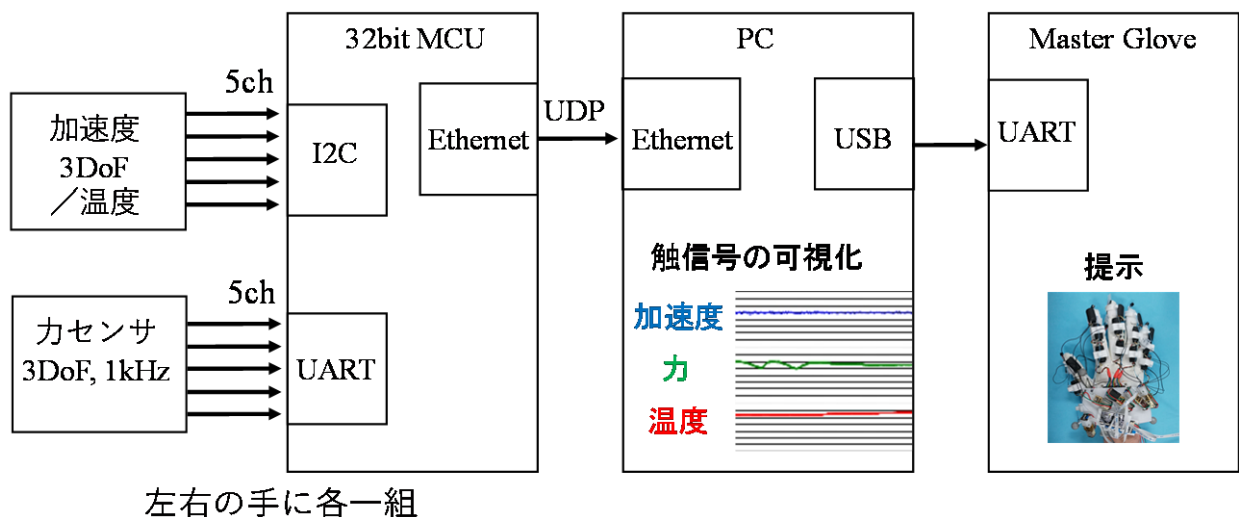


図 4 触情報の計測から提示への流れ

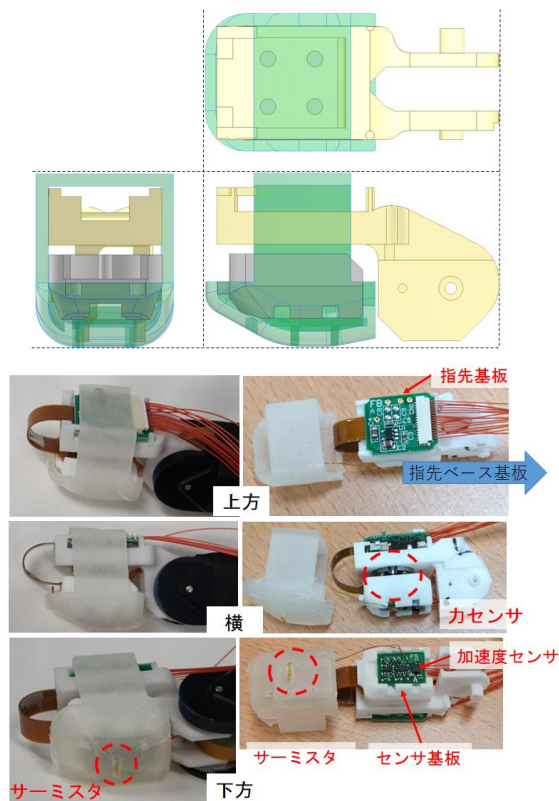


図 3 指先の構造（上：設計図，下：開発物）

の指に取り付けた人工皮膚を図 5 に示す。試作した人工皮膚は遠隔問診 MR で患者の肌温度の提示に利用[11]したがシリコンだけの人工皮膚に比べると伝熱が早く感じられたことから、熱伝導性のよい人工皮膚として構成できているといえる。

指先は 3DCAD で設計し、立体印刷器により三次元造形した。指先ベース骨やセンサ固定部は硬い素材であるナイロンで造形し、指先カバーは柔軟性がある素材



図 3 高伸縮フィルムで覆った指（上側）と調製した酸化アルミ-シリコン樹脂カバーで覆った指（下側、ちぎれない程度に強めにつまんで厚みを計測）

（AGILISTA（AR-G1L）、ショア硬度 35）を用いて造形した。物体をつかみやすくするためである。TELESAR V の指腹はもっと硬い素材で造形されていたことから、TELESAR VI では物体をつかみやすくなると考えられる。

4. おわりに

人型ロボットの触覚計測機能の実現をめざし、力／加速度／温度センサを用いた指先を開発し、両手の指先（5 指）に組み込んだ。これら触覚の計測データは手の甲に搭載した触覚ベース基板を通じて PC に取り込み、マスターグローブへ伝送可能である。指先は物体をつかみやすくするために、指骨のような硬いベースと柔軟性を持つ表面素材で構成することで、マスター操縦者による細かな手作業への対応をめざす構成とした。

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」の支援によって行われた。

参考文献

- [1] C. L. Fernando *et al.*, “Design of TELESAR v for transferring bodily consciousness in telexistence,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 5112-5118, 2012.
- [2] S. Tachi, K. Minamizawa, M. Furukawa, and C. L. Fernando, “Haptic Media: Construction and Utilization of Human-harmonized ‘Tangible’ Information Environment,” *2013 23rd Int. Conf. Artif. Real. Telexistence*, pp. 145-150, 2013.
- [3] F. Kato, C. L. Fernando, Y. Inoue, and S. Tachi, “Classification method of tactile feeling using stacked autoencoder based on haptic primary colors,” *Proc. - IEEE Virtual Real.*, pp. 391-392, 2017.
- [4] N. Wettels, V. J. Santos, R. S. Johansson, and G. E. Loeb, “Biomimetic Tactile Sensor Array,” *Adv. Robot.*, vol. 22, no. 8, pp. 829-849, 2008.
- [5] Y. Gao, L. A. Hendricks, K. J. Kuchenbecker, and T. Darrell, “Deep learning for tactile understanding from visual and haptic data,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 2016-June, pp. 536-543, 2016.
- [6] 日本バーチャルリアリティ学会, 舘暲, 佐藤誠, 広瀬通孝, バーチャルリアリティ学. 工業調査会, 2010.
- [7] S. Tachi, *Telexistence*, 2nd Editio. World Scientific.
- [8] 舘暲, 井上康之, 加藤史洋, C. L. Fernando, Y. Saraiji, “テレグジスタンスの研究 (第 96 報) —TELESAR VI : 67自由度を有するテレグジスタンスAVATARシステム—,” テレグジスタンス研究会, pp. 1-6, 2020.
- [9] 井上康之, 加藤史洋, 舘暲, “テレ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自由度テレグジスタンスロボットの全身マスタースレーブ制御—,” テレグジスタンス研究会, pp. 7-10, 2020.
- [10] 加藤史洋, 井上康之, 舘暲, “テレ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スレーブの提案—,” テレグジスタンス研究会, pp. 15-18, 2020.
- [11] J. Fu, F. Kato, Y. Inoue, and S. Tachi, “Study on Telexistence C: A Telediagnosis Platform based on Telexistence: Investigation of the Roles of Presence and Tactile Information in Telemedicine,” *第15回テレグジスタンス研究会*, pp. 19-22, 2020.

テレ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-

Study on Telexistence XCIX Haptic Master Glove for TELESAR VI

加藤史洋¹⁾, 井上康之¹⁾, 舘璋¹⁾

Fumihiko KATO, Yasuyuki INOUE, and Susumu TACHI

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, {fumihiko.kato, y-inoue, tachi}@tachilab.org)

Abstract: We propose a haptic master glove for TELESAR VI operation. The force was presented without the conventional sticky gel pad, and the fingertip was pinched by a thread drive to enable the presentation of a deep sense to the finger. A master glove that can present continuous force from the force of the tactile area to the deep sensation was constructed. The haptic master glove was synthesized with the finger position / posture sensing system. In addition, it was shown that tactile presentation corresponding to the tactile primary colors is possible by combining with the tactile (vibration / temperature) presentation module.

Key Words: haptic display, haptic primary colors, humanoid robot, telexistence

1. はじめに

マスタスレーブシステムでの触感の提示はテレグジスタンスロボットの操作に役立つ。柔らかい物体を破壊せずに操作するためには力加減をしてロボットの指を動かす必要がある。つかんでいる素材の柔らかさの提示ができればロボット操縦者は力を加減して操作することができる。本報告では、糸駆動を用いた力提示マスターグローブを提案する。

マスタハンド向けの力提示機構は、外骨格型かつ遭遇型の提案[1]やデータグローブ[2]を用いて指先に装着するベルト駆動の圧力・せん断力の提示を可能とする手法[3]が提案されている。またマスタハンド向けではないが SPIDAR-G6[4]のように糸をモーターで巻き取ることで指先に力を提示する指先装着型の力提示手法が提案[5]されている。本提案は前者のようなマスターグローブでありながら後者のような糸駆動による力提示をめざした手法の提案である。

2. 装着型深部感覚提示グローブ

筆者らの従来の提案では、粘着ゲルパッドを指の背面と側面に配し、糸を用いてゲルパッドをつまみ引き上げることで指腹と深部感覚へ力を提示する手法[6][7]を採用した力提示機構を用いていた。本提案では従来の 1 本指での提示を 5 本指グローブ化し、慣性センサと光学式マーカを併用した指位置・姿勢システム[8]と組み合わせて指の姿勢取得と両立可能にした。また、TELESAR VI のロボットハン

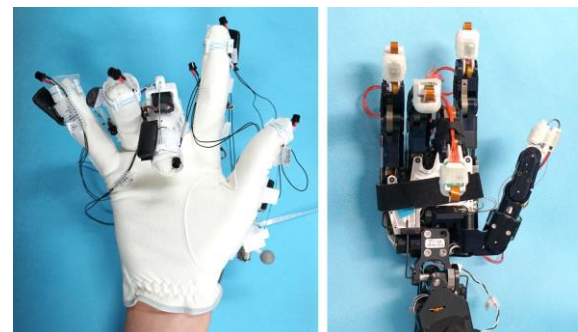


図 1 力提示マスターグローブ (左: マスタ側, 右: ロボットハンド)

ドが取得した触情報を提示可能にする力提示マスターグローブを構築した (図 1)。

2.1 力提示機構

2.1.1 従来のゲルパッドを用いた力提示機構

図 2 に示す従来の力提示機構では、指先の背面と側面とに粘着性のゲルパッドを取り付ける (図 2 (a))。側面へ背面部に通した釣り糸を引くことで、指の側面の皮膚が引き上げられると指腹がつっぱることで擬似的な圧力を提示できる (図 2 (b))。さらに糸を引くことで皮膚の変形範囲を超えると関節を動かして深部感覚を刺激する (図 2 (c))。以上より、触覚から深部感覚まで連続的な力の提示を糸駆動により実現できた。

粘着ゲルパッドを用いる手法では特に夏場など気温が高い場合は手指が汗をかくことで粘着面が湿ってしまい、粘着力が低下することで、糸を引き上げても指先には力を提示することができなくなる課題があった。そこで、粘着ゲルパッドの代わりに指先の側面をつまみ上げて引き上げることによる力の提示手法を構築した。

2.1.2 指先をつまみ上げる力提示機構

ゲルパッドを使わずに、同様のメカニズムで力を提示する提示機構を提案する。ゲルパッドは肌との密着性を保ちながら指の側面を上方に引き上げる役割があったため、糸を引くことで弾性のある開いたリング形状のつまみが指を挟み込み、糸を引き上げることで指腹を引き上げる。**図 3** 上部に試作した指先つまみを指先にはめた様子を、下部に模式図と組み込んだグローブを示す。本手法に置き換えることで指先の湿度合いによらず深部感覚へ力を提示することが可能である。また、粘着ゲルと同様にはじめは指腹への弱い力の提示から、糸を引く力を増やすことで深部感覚へと連続的な力の提示が可能である。しかし、本手法では粘着ゲルが指側面を引き上げて指の皮膚に緊張を与えていたのとは違い、指腹面の底の両端を引き上げることで緊張を与えている。同様に指腹部へ突っ張りを与えるには指の側面部への密着性を高める工夫が必要と考えられる。

2.2 力提示システムの構成

各指先に配置した指先つまみを引くメカニズムの模式図を**図 3** に示す。本提案では NUIBOT[9]システムで用いられているモータドライバ（MCU は PIC32 MM0064 GPL036）を利用している。PC とドライバ間は USB から変換基板を経て UART（Universal asynchronous receiver-transmitter）にて接続される。PC からの司令に基づきモーターの回転数や電流量が制御される。使用したモータドライバは1つのドライバ基板あたり最大4個のモーターを接続できるため、2個のドライバ基板に5指分のモーターを振り分けて接続した（**図 4**）。ドライバ間の接続にも UART が用いられる。ギアボックスが付属する DC モーター（マイクロ金属ギアモーター HP 6V, ギア比 5:1, Pololu Robotics & Electronics）を利用した。ドライバボードには2つの PWM コントローラ（DRV8833, Texas Instruments）が搭載され、モーターの回転を制御する。ギアの出力シャフトにはゴム磁石が接着されたプーリーが接続され磁気センサによりプーリーの回転数がカウントされる。回転量により糸の長さが計測できるため位置制御が可能で、またドライバボードに搭載されているセンサにより電流つまりは出力する力も制御可能である。使用した釣り糸は人の指を傷つけないようにするため適度な張力でちぎれることで安全を保てると考えられる太さの 0.8 号（耐荷重 4.8 kg, YGK よつあみウルトラ 2 ダイニーマ）を用いた。

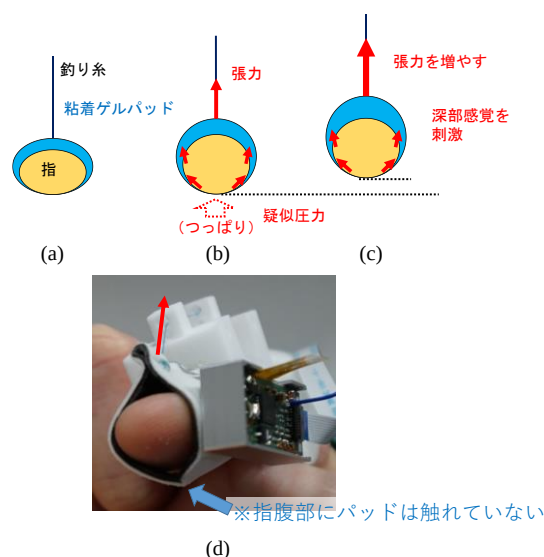


図 2 粘着ゲルパッドと糸による力提示（従来手法）

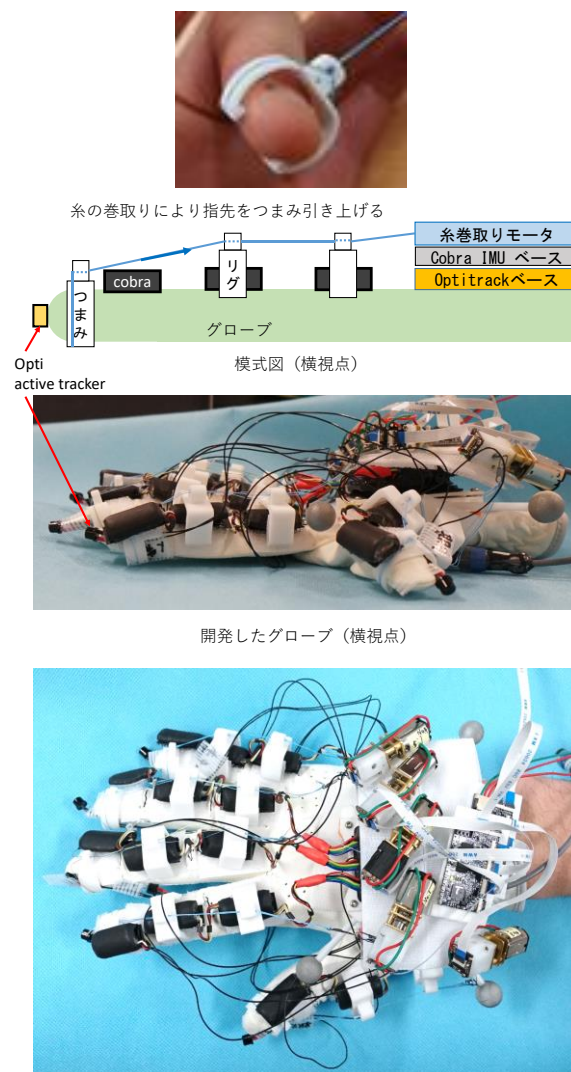


図 3 グローブの模式図と開発物（提案手法）

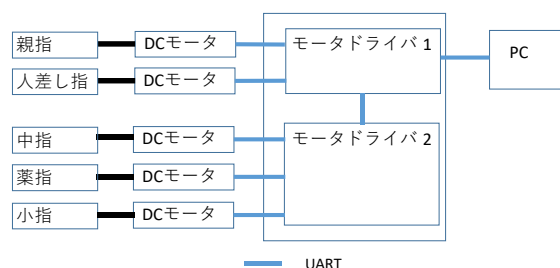


図 4 力提示システムの構成

2.3 指の姿勢計測システム

図 3 に示すようにグローブの各指先には赤外線 LED マーカ（アクティブトラッキング方式）が装着され、光学式モーションキャプチャシステムにより 30Hz で指先位置を取得可能である。また、慣性式センサ（AiQ Synertial Ltd, IGS-CobraGlove16）がグローブの各指骨上に配され、指先位置と姿勢が計測可能である[8]。本マスターグローブにおいてもこれらを統合して利用する。

2.4 取得した触覚の伝送

TELESAR VI の指先に搭載された触覚センサが取得した触原色（力、振動、温度）情報をマスターグローブに PC 経由で伝送[10]（図 5）し、触覚情報の提示を可能とした。JST 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」プロジェクトで開発した振動・温度の 2 触提示モジュール（図 6）[11]と本提案手法の力提示を組み合わせることで、これらの触原色に対応する触覚情報

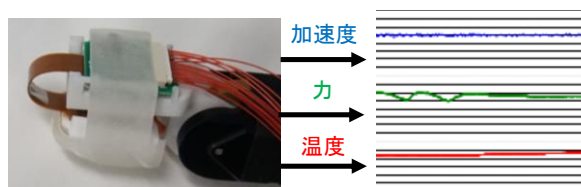


図 5 触情報の伝送

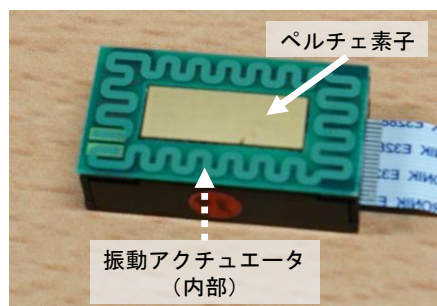


図 6 2 触（振動・温度）提示モジュール

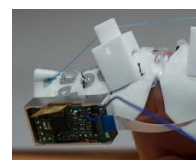


図 7 力提示グローブに 2 触モジュールを組み合わせた例[7]

の提示が可能である[12]。2 触モジュールには内部に振動アクチュエータ（フォースリアクタ TMAF シリーズ アルプス電気）が、上面には冷却用のペルチェ素子（KSMH029F KELK Ltd.）とヒーターが搭載されている。2 触モジュールはグローブの指先等に容易に装着可能である（図 7）。

3. おわりに

本稿では TELESAR VI のための力提示マスターグローブを提案した。力の提示には、従来手法である粘着ゲルパッドを用いず、指先を糸駆動でつまむ手法にて指への深部感覚の提示を可能とした。手指の位置・姿勢センシングシステムと統合して 5 本指の指先への触覚領域の力から深部感覚まで連続的な力を提示可能なマスターグローブを構築した。また、2 触（振動・温度）提示モジュールと組み合わせて触原色に対応した触覚提示が可能であることを示した。

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」の支援によって行われた。

参考文献

- [1] K. Sato, K. Minamizawa, N. Kakawami, and T. Susumu, “Haptic Telexistence,” *Proc. of SIGGRAPH, Emerging Technologies*, 2007.
- [2] C. L. Fernando, “Experiencing ones own Hand in Telexistence Manipulation with a 15 DOF Anthropomorphic Robot Hand and a Flexible Master Glove.”
- [3] C. L. Fernando *et al.*, “Design of TELESAR v for transferring bodily consciousness in telexistence,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 5112–5118, 2012.
- [4] K. Akahane, Y. Koike, S. Hasegawa, and M. Sato, “A proposal of a high definition haptic rendering for stability and fidelity,” *Proc. - 16th Int. Conf. Artif. Real. Telexistence -*

- Work. *ICAT 2006*, pp. 162-167, 2006.
- [5] 青木孝文, 三武裕玄, 長谷川晶一, 佐藤誠, “フイヤーによる皮膚感覚刺激を用いた 指先装着型接触感提示デバイス,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 14, no. 3, pp. 421-428, 2009.
 - [6] F. Kato, Y. Inoue, and S. Tachi, “A haptic glove to display softness by stimulating deep sensation,” *IEEE World Haptics Conf. hands-on-demo*, 2019.
 - [7] F. Kato, Y. Inoue, and S. Tachi, “Haptic Display Glove Capable of Force / Vibration / Temperature,” *Proc. ISMCR*, D2-2-1 - D2-2- 5, 2019.
 - [8] 井上康之, 加藤史洋, 舘暲, “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—,” テレイグジスタンス研究会, pp. 7-10 2020.
 - [9] S. Zile, Guo and Dakal, Binod and Li, Haoyan and Nishino, Tomoka and Mitake, Hironori and Hasegawa, “Nuibot: Motion Control System and Visual Programming Environment for String Driven Soft,” pp. 7-9.
 - [10] 加藤史洋, 井上康之, 舘暲, “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—,” テレイグジスタンス研究会, pp.11-14, 2020.
 - [11] M. Nakatani *et al.*, “A novel multimodal tactile module that can provide vibro-thermal feedback,” *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 432, pp. 437- 443, 2018.
 - [12] K. Fumihiro, T. Susumu, and I. Yasuyuki, “A haptic glove to display softness by stimulating deep sensation,” in *World Haptics Conference Hands-on Demos*, 2019, DM1.23.

Study on Telexistence C: A Telediagnosis Platform based on Telexistence: Investigation of the Roles of Presence and Tactile Information in Telemedicine

Junkai Fu¹⁾, Fumihiro Kato²⁾, Yasuyuki Inoue²⁾, Susumu Tachi²⁾

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, junkai@tachilab.org)

2) 東京大学 高齢社会総合研究機構 (〒113-0032 東京都文京区本郷 7-3-1, { fumihiro.kato, y-inoue, tachi }@tachilab.org)

Abstract : This paper proposes a telediagnosis system that allows medical staff to examine remote patients through telexistence robot system with tactile sensor/display. The system consists of three components, an audio-visual telexistence system for telecommunication, a skin-like tactile display equipped with thermal and heartbeat display devices, and body temperature and heartbeat measurement equipment. In comparison with conventional telephone and videophone, this VR system is expected to allow the medical staff to examine the patient more carefully as if he or she is observing the patient face to face. To test this, 10 medical doctors and 2 nurses evaluated this system. According to the results, the influence and effect of telexistence and tactile display on telediagnosis are discussed. Also, the feasibility of the system for improving the reality of telediagnosis is verified and discussed.

Keywords : Teledignosis, Telexistence, Haptics, Mixed reality

1. Introduction

In recent years many countries have come into an aging society. The cost for the elder to have a diagnosis always spends a lot no matter the time or money on the trip. Hence the health care targeted at the aged is an urgent matter. Telemedicine is suitable to do this. Traditional telemedicine concentrates on using information technology such as audio, video to provide medical diagnosis and other treatment from professional doctor to the patient. It can reduce the cost of medical treatment and the risk of cross-infection for infectious diseases. However, the conventional telemedicine system through IT systems such as videophone is not an efficient way, which limits the transmitted information for a doctor to diagnosis. By using telexistence, this research is devoted to enhancing the communication between doctor and patient and narrow the gap like in the same room. By using a surrogate that can simulate the patient's pulse and temperature, the doctor's side will feel like palpating directly.

2. Telemedicine System

Combining virtual reality (VR) with health care has been proposed for decades of years. Early surveys reported that research using virtual reality to do surgery, medical education can go back to the 1990s[1].

With the development of VR/AR/MR, more and more applications and research in telemedicine emerged. Telepresence surgery has already commercialized for many years. Also, due to the high accuracy, this kind of surgery system such as the da Vinci telerobotic surgical system, has been increasingly used[2]. Moreover, palpation based on VR simulation has also been proposed. Timothy et al. use artificial force to simulate the feeling of human skin and apply the system into the palpation and insertion training[3]. To achieve telemedicine, a robot own partial function as a human is also a viable way. Garingo et al. apply a mobile robot into neonatal intensive care to help people from a distance[4].

This research targets the daily diagnosis, which is before the confirmation of the disease and surgery. The frequency may be very high and last for a long time. To makes the palpation between people in different places possible, we propose a telediagnosis system with a tactile display. We hope this tactile display can be used in diagnosing a difficult illness, which cannot be determined without touch and some illness transferred into data in number is obscure to understand, but once being touched, these symptoms can be easily judged. In this way, the system shortens the distance between the patient's home and medical

institution. There is no need for the aged to stay at the hospital every day. With this, he/she can accomplish a diagnosis just at home.

For that purpose, we choose a surrogate robot and use a surrogate arm to achieve the system. The system must follow these principles[5]. It must be real-time to ensure communication quality. A doctor can see, hear, and touch the patient to judge the condition, and able to see his body in the virtual space to ensure immersion and make interaction. We choose pulse and temperature to measure from the patient and reproduce to the doctor precisely and realistically because it is comfortable for reproduce but always essential in all the diagnosis. If this idea works, the more bio-signal can be added to the system to enlarge its usability.

The human's regular pulse is between 60~120 bpm. The disease may cause the heart rate beyond the range. For example, paroxysmal supraventricular tachycardia (PSVT) is the most common symptom of tachycardia. The pulse can reach 140~180 bpm. Besides, the temperature and pulse are in positive correlation. Usually, pulse increases by 10 bpm when the temperature rises by 0.5°C. Therefore, in response to possible occasions, we need to set the reproducing pulse range between 40~200 bpm on the surrogate arm to simulate arrhythmia.

3. System Design & Implementation

The system consists of two parts. One is the patient-side, the other is the doctor-side.

Patient-side: The patient is supposed to wear a glove with sensors and sit in front of a 6 DOF robot. With the sensors embedded in the robot and glove, the audio-video information and bio-signal of the patient are recorded and transmitted to the doctor-side. This part is made up of two components: (1) A doctor-surrogate robot is supposed to perceive the surrounding's information including the patient's appearance, voice, and replicate the voice and gestures recorded from the doctor-side. (2)

Sensors on the glove measure the pulse and temperature of the patient. The sensor data are stored and processed in a micro control unit (MCU), and then the bio-signal information is transmitted to the doctor-side.

Doctor-side: The doctor wears a Head-mounted display (HMD) connected to the surrogate robot in the patient-side, which reconstruct the surrounding of the patient's room. Also, the HMD is equipped with a stereo camera for achieving video-seethrough; that is, the doctor can recognize his/her own hands overlapping in the image of the patient-side. The doctor-side's image except for the hands is eliminated by using chroma key screens in a Unity project. This method realizes the mixed reality. Furthermore, a patient surrogate arm equipped with many devices is placed in front of the doctor to reproduce the bio-signal information of the patient. Owing to the system, it is expected that the doctor can feel as if he/she were diagnosing the patients face to face.

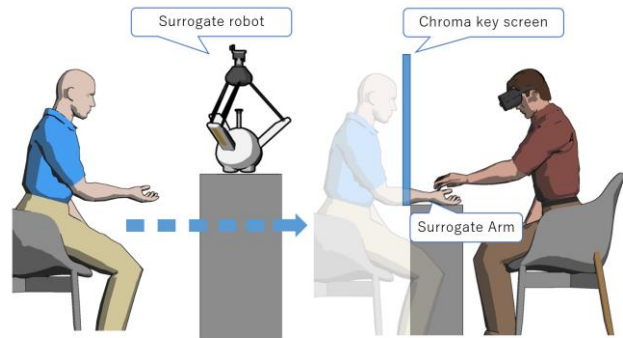


Figure 1: System schematic diagram

3.1 Audio-video Reproduction

3.1.1 Surrogate robot at patient'side

The robot (RT-Telbee) used in patient-side equipped with a stereo camera, a binaural microphone, and a speaker, making

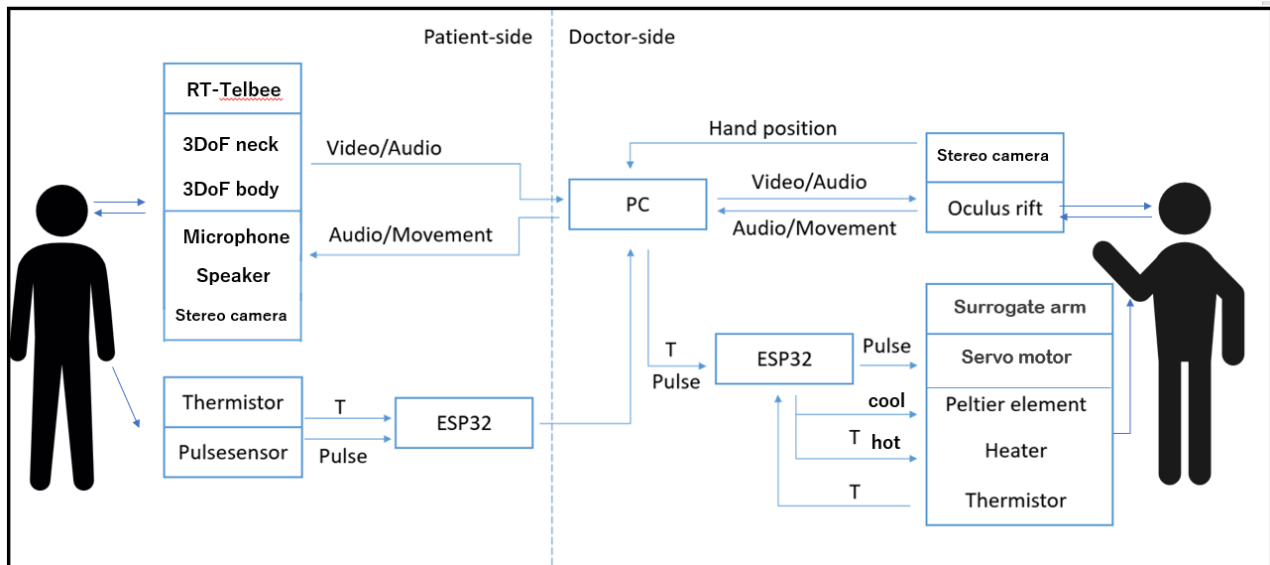


Figure 2 : System data diagram

itself able to communicate like a human. It also has a 6-DOF mechanical system, which allows the doctor-side connects it with an HMD (Oculus Rift CV2, Facebook Technologies, LLC)[6] to control its movement.

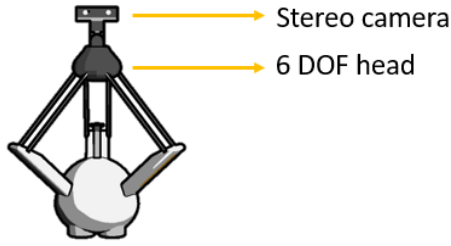


Figure 3: Construction of 6 DOF robot RT-Telbee

3.1.2 Mixed reality at doctor-side

To increase the realistic feeling and maintain the presence of the doctor-side, we attached a stereo camera on the HMD and extract the doctor's hand from the surrounds in the local by using chroma key compositing. The doctor is able to see his hand while wearing the HMD, and the hand is overlapped with the background transmitted from the patient-side. Because the HMD is tracking by sensors and connected with the surrogate robot at the patient-side, while he moves, the vision in the HMD will also change like figure 4.



Figure 4: MR environment in the HMD

3.2 Bio-signal reproduction

3.2.1 Detecting glove

Patient-side uses a glove equipped with a pulse sensor (PulseSensor, World Famous Electronics llc.)[7], A negative temperature coefficient (NTC) thermistor (56A1002-C3, Alpha Sensors, Inc.) and an MCU (ESP32-WROOM-32D, Espressif Systems Pte. Ltd) to detect the pulse and temperature.

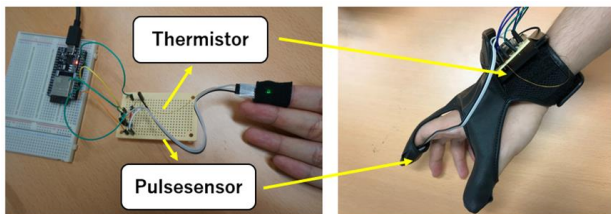


Figure 5: Bio-signal detecting glove

3.2.2 Surrogate for reproduction

Doctor-side receives the bio-signal and reproduces the pulse and temperature on a surrogate arm like figure 6. Under the artificial skin(a mixture of silicone and Al_2O_3 powder), there are

a heater and flexible tube to generate heat and pulse.

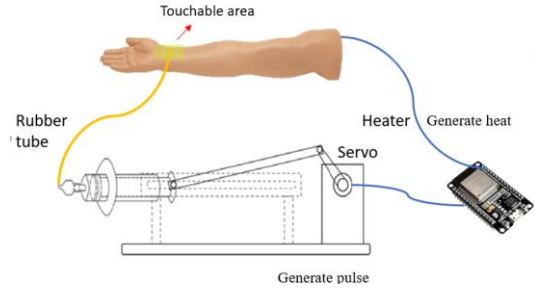


Figure 6: Mechanism of the reproduction system

But we found the surrogate in what kind of shape does not matter, so we developed a smaller one with a cooling module to replace the surrogate arm like figure 7. A heater cooperates with a Peltier element to keep the temperature the same with the patient. A mechanical crank system is responsible for applying pressure to the liquid in the tube to imitate the pulse.

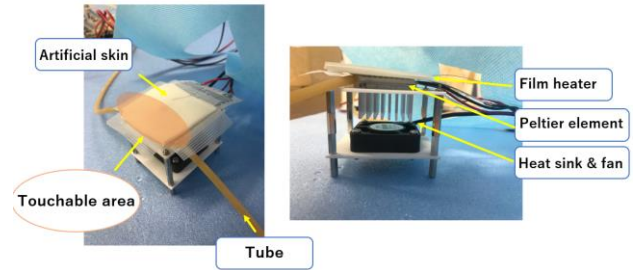


Figure 7: New surrogate with a cooling module



Figure 8: System in two sides (upper) and the view from the doctor/patient (below)

4. Experiment

To test this telediagnosis system is useful or not. More specifically, compared to the traditional telediagnosis system, this system can provide a better reality or not. Can the tactile display bring more clues and do benefits to the telediagnosis. We did an experiment with 12 medical experts. The participants were required to make a complete diagnosis like a real medical examination by using this VR system and the traditional videophone separately. The procedure is almost the same except for that in the videophone method; there is no palpation on a tactile display.

After the experience, they are asked to answer two

questionnaires to evaluate the system. At last, we had an interview to listen to their comments.

5. Results

After using each system (VR and videophone), there four questions as follows:

Q1. I felt as if I were actually in the room where the patient is in.

Q2. I felt as if the patient were actually in front of me.

Q3. I felt as if the medical examination was actually performed.

Q4. I felt tense while performing a medical examination.

The score is shown as follows:

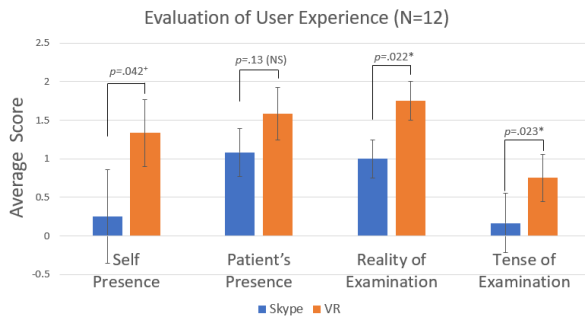


Figure 9 : Evaluation of User Experience

From figure 9, we can see that the scores for the VR system were significantly better than the videophone system except for the Q2 “patient’s presence.” We had an interview after the experiment and know that they are particularly dissatisfied with the image quality. Compared to the video in skype, the image quality in HMD is very poor. The patient’s image isn’t clear enough, so the patient’s presence will also be damaged. The Q3 shows a positive overall judgment. It means that, by using VR system, the participants could have a more realistic feel for the examination. Finally, for Q4, the VR telediagnosis brings more tension. As our thought, it means the experts treat it more seriously and more like the actual diagnosis.

After all the experiments, they were required to answer about the impression of the VR diagnosis system.

Table 1: Answer of questionnaire2

	YES	NO
Q1: Have you ever experienced another telemedicine system?	1	11
Q2.1: If Q1 is “YES,” do you think the VR system is more real?	1	0
Q2.2: If Q1 is “NO,” do you think the VR system is real?	10	1
Q3: Do you think VR experience is useful for the examination?	12	0
Q4: Do you think the tactile display is useful for the examination?	10	1
Q5: Do you want to use a VR telediagnosis system?	11	1

The results are shown in table1. Most of them agreed that this VR system is presented with a realistic experience like an actual examination. Furthermore, all of them agreed that the VR system and the tactile display is useful while performing a clinical examination. But after the interview, they also said a lot about

the system defects, such as image quality, and the limitation to determine disease just by pulse and temperature.

6. Conclusion

In our research, we proposed a telediagnosis system based on Telexistence. This system contains a surrogate robot and a tactile display. By using this system, the medical staff can palpate the patient like face to face. Then, we did an experiment to compare this system with the traditional telediagnosis system. This telediagnosis system performed a better ability in diagnosis, according to the medical experts. But there are also many defects that need to be improved. In the future, the most urgent need is to improve image quality. Secondly, the tactile display should provide more information such as blood pressure or other bio-signal to enhance its usability. And versatility should also be considered, other parts like neck or foot also can be developed in the tactile display. Finally, due to the high reality, this system also can be used in medical training to improve the practical skills of medical staff.

Acknowledge

This project is supported by JST ACCEL Embodied Media Project (JPMJAC1404).

Reference

- [1] J. Moline, “Virtual reality for health care: A survey,” *Stud. Health Technol. Inform.*, vol. 44, pp. 3–34, 1997, doi: 10.3233/978-1-60750-888-5-3.
- [2] G. H. Ballantyne and F. Moll, “The da Vinci telerobotic surgical system: The virtual operative field and telepresence surgery,” *Surg. Clin. North Am.*, vol. 83, no. 6, pp. 1293–1304, 2003, doi: 10.1016/S0039-6109(03)00164-6.
- [3] T. R. Coles, N. W. John, D. Gould, and D. G. Caldwell, “Integrating haptics with augmented reality in a femoral palpation and needle insertion training simulation,” *IEEE Trans. Haptics*, vol. 4, no. 3, pp. 199–209, 2011, doi: 10.1109/TOH.2011.32.
- [4] A. Garingo, P. Friedlich, L. Tesoriero, S. Patil, P. Jackson, and I. Seri, “The use of mobile robotic telemedicine technology in the neonatal intensive care unit,” *J. Perinatol.*, vol. 32, no. 1, pp. 55–63, 2012, doi: 10.1038/jp.2011.72.
- [5] Susumu Tachi, *Telexistence 2nd Edition*. World Scientific, 2015.
- [6] “Oculus.” [Online]. Available: <https://www.oculus.com>.
- [7] “PulseSensor.” [Online]. Available: <https://pulsesensor.com/>.

Fusion: Wearable Telexistence System for Body Sharing and Mutual Collaboration

MHD Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Kouta Minamizawa, Masahiko Inami

1) Keio University Graduate School of Media Design

2) University of Tokyo

yamen@kmd.keio.ac.jp

Abstract : Fusion is a novel Telexistence system that enables shared body frame for mutual collaboration and tasks sharing. Fusion enables upper body sharing over a remotely operated wearable system, allowing one person “Operator” to dive into someone’s else body “Surrogate”. The system extends the limbs mobility and actions of the operator using two robotic arms mounted on the surrogate body. These arms can be used independently of the surrogate arms for collaborative scenarios or can be mounted as exoskeleton to surrogate’s arms to be used in remote body assisting or as motion guidance. Using Fusion, we realize three levels of bodily driven communication: Direct, Enforced, and Induced. We demonstrate through this system the possibilities of truly embodying and transferring our body actions from one person to another, realizing on body communication.

Key Words: *Wearable Telexistence, Exoskeleton Robots, Collaborative Systems*

1. Introduction

In collaborative and cooperative tasks, effective communication plays an important role in bridging the skills and knowledge between multiple people. Wearable telepresence systems enables remote communication between two or more remote parties to gain awareness of a single space, and a shared perspective for collaboration. During our daily communication with others, we rely on direct communications, such as verbal and body language, to express the internal thoughts and experiences. Telexistence and Telepresence systems addressed remote collaboration and mediating one person’s actions to another via several approaches, such as head-mounted displays [1], body image projection [9], and wearable omnidirectional cameras [12]. Such approaches enable remote activities: e.g. touring for mobility impaired people [3] or sharing experiences in outdoor activities [2].

In scenarios which involve motor skills learning and body postural adjustment (e.g. dancing), a trainer would adjust physical the postural of the trainee by enforcing his body to the correct posture. Also, the trainer might guide the body movement by inducing forces to direct the trainee to follow a certain route or sequence of actions. These three levels of communications: *Directed, Enforced and Induced* are bodily driven, which means they require

the active involvement of body actions to communicate our intentions. In remote situations, such collaborative tasks become more challenging due to the lack of means to represent our body actions.

In this research, we present “Fusion”, a novel wearable system that can be used to achieve full body surrogacy, producing effective body driven communications. Fusion enables two people to share the same point of view with the capacity to reproduce body motion of an operator into the surrogate, enabling the operator to effectively communicate and collaborate remotely. Figure 1 shows the three levels of communication achieved using Fusion.

2. Related Work

A body of work has explored the use of shared the same point of view of other people for the purpose of remote collaboration. [4] realized the concept of Jacking In¹ into someone else’s point of view using a mounted omnidirectional camera, allowing others to access one’s visual feed and used verbal communication for collaboration. [5] uses a similar concept, but also adding the ability to share non-verbal cues in communication using Mixed Reality visual feedback. Such systems provide

¹Referring to the term used by William Gibson’s in “Neuromancer”.

lightweight solutions for direct communication, however, they do not provide body driven actions towards the remote user. Body action synchronization and matching systems were also proposed to enable muscle control and mapping, such as [7]. Although Electro Muscle Stimulation (EMS) based solutions are promising for motor skills learning and control, however, they still lack the ability to produce continuous motion trajectory. Also, such solutions are not suitable for long use due to the fatigue caused to the muscles.

In this work, Fusion, we addressed the previous limitations, while maintaining a high level of portability and accessibility of shared actions for remote collaboration and effective body communication. We also derive from supernumerary robotic limbs research body [10, 8] in the concept design of the system.

3. Fusion Overview

Fusion, as shown in Figure 2, consists of an operator and a surrogate that are spatially separated. The operator uses off-the-shelf HMD enabling him to access surrogate body.

The proposed system enables three levels of communication as shown in Figure 1 and described as follow:

- **(A) Direct Actions:** The arms are independently controlled by the operator without linkage to the surrogate arms. This level is aimed for collaborative aspect at which co-working is needed.
- **(B) Enforced Posture:** Fusion arms are mounted as an exoskeleton to the surrogate arms, forcing his arms posture. We target in this level to embodied-communication aspect and muscle motion transfer. Also, it may have applications relevant to physical rehabilitation and remote therapy.
- **(C) Induced Motion:** This level allows the operator to induce motion in the direction of the arms. Here the arms are also mounted as exoskeleton, but since their length is longer than the surrogate, it induces pulling perception on the wrists. We experimented both to direct the walking of the surrogate, as well as the direction changes.

The surrogate mounts a backpack that consists of three axes robotic head with stereo vision and binaural audio, and two anthropomorphic robotic arms (Seven Degrees of Freedom) with removable hands shown in Figure 1(D). As shown in the figure, the robotic head is placed on the shoulder of the surrogate user, on the same eye level. We considered to use a head mounted camera system similar to [4] however since it is important to



Figure 1: “Fusion” used as a wearable Telexistence system for embodied and physical communication. (A-C) Three levels of communication are realized: (A) *Direct Actions*, (B) *Enforced Postures*, and (C) *Induced Motion* (blue arrows represent the induced motion). (D) End effector can be either a humanoid hand or exoskeleton mount

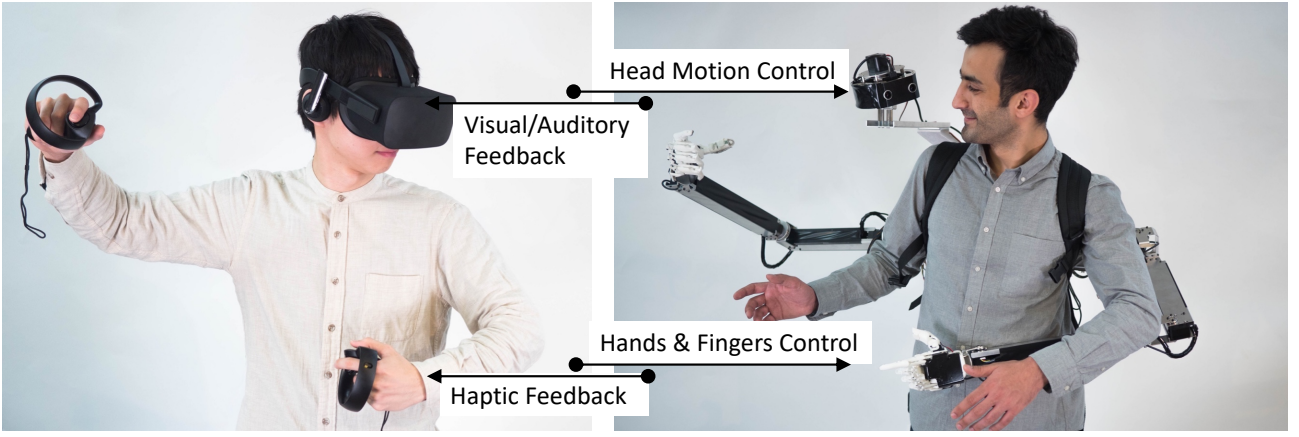


Figure 2: Fusion system overview, an operator (left) can access a surrogate (right) to control and perceive feedback.

maintain stereoscopic vision, an anthropomorphic head design was required. The design of the head and the Telexistence system is based on previous work, Telexistence Toolkit [6]. Due to the shift of the head position to the side, the hands were shifted accordingly to maintain eye to hand mapping. Thus the hands are not perfectly centered, but rather shifted 30cm to the right side.

The system is mobile, allowing the surrogate to freely move and walk while wearing the backpack, enabling outdoor applications. The overall weight of the system without a battery is 10k.g, with a Li-ion battery is 12k.g which let the system to operate for an average of 2 hours continuously. The system operates over the network, and is designed with low latency communication. The end-to-end stereoscopic visual feedback latency does not exceed 100ms for stream of 1280x720@60FPS per eye.



Figure 3: An example of co-working on the same task between surrogate and remote operator (picture from United Nations AI for Good Summit 2019).

As the system is wearable, the remote operator may feel motion sickness due to undesired motions and movements caused by the surrogate user. To address this issue, the 3 DoF head is implemented with active stabilization on the pitch and roll axis, and a damped yaw axis.

4. Discussion

Although Fusion was not formally evaluated whether it enhanced the quality of collaboration, or the skill transfer aspect, however it was publicly exhibited at various venues such as SIGGRAPH 2018 [11], Amazon MARS 2019, United Nations AI for Good Summit 2019, and several public open-lab events. Operators ages were ranged from 13-year-old up to 70-year-old from both genders.

Our empirical use of Fusion showed the effectiveness of sharing the working space and that remote operators were able to co-work with surrogate users for simple tasks and operations Figure 3. The remote operators did not require training to operate the system, and were capable to do pointing, grasping, waving, and handshaking within 5 minutes of operation. One drawback of the operation is the use of VR controllers instead of dataglove system, which was not very intuitive for some users.

Fusion was also tested as exoskeleton mode for Enforced Postures. Users had to relax their muscles in order to effectively drive their posture. Several remote operators reported that when they look at their hand (which as the surrogate hands in respect), they feel as their body was substituted. This is due to the correlated motions between the surrogate and operator's body. This could be interesting approach for understanding how to be in someone else's body.

5. Conclusion

In this work, we proposed a body sharing platform named “Fusion” to allow two participants to share the same point of view and collaborate together designed in a shape of a backpack. With two anthropomorphic robotic arms, the remote operator can co-work with the surrogate wearing the robot, or the robot can be mounted as exoskeleton on the surrogate arms. Depending on how the backpack robotic arms are used, the system would enable three types of communications between the operator and the surrogate: Direct Actions, Enforced Posture, and Induced Motions.

Acknowledgment

This project is supported by JST Kakenhi (HH19177), JST ERATO JIZAI BODY Project (JPMJER1701), and JST ACCEL Embodied Media Project (JPMJAC1404).

References

- [1] Judith Amores, Xavier Benavides, and Pattie Maes. Showme: A remote collaboration system that supports immersive gestural communication. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 1343–1348, 2015.
- [2] Jed R Brubaker, Gina Venolia, and John C Tang. Focusing on shared experiences: moving beyond the camera in video communication. In *Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference*, pages 96–105, 2012.
- [3] Lilian de Greef, Meredith Morris, and Kori Inkpen. Teletourist: Immersive telepresence tourism for mobility-restricted participants. In *Proceedings of the 19th ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing Companion*, pages 273–276, 2016.
- [4] Shunichi Kasahara and Jun Rekimoto. Jackin head: immersive visual telepresence system with omnidirectional wearable camera for remote collaboration. In *Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 217–225. ACM, 2015.
- [5] Gun A Lee, Theophilus Teo, Seungwon Kim, and Mark Billinghurst. Sharedsphere: Mr collaboration through shared live panorama. In *SIGGRAPH Asia 2017 Emerging Technologies*, page 12. ACM, 2017.
- [6] Yamen Saraiji MHD. Beyond presence. *日本ロボット学会誌*, 36(10):673–677, 2018.
- [7] Jun Nishida and Kenji Suzuki. Biosync: Synchronous kinesthetic experience among people. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 3742–3745. ACM, 2016.
- [8] Federico Parietti and H Harry Asada. Supernumerary robotic limbs for aircraft fuselage assembly: body stabilization and guidance by bracing. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1176–1183. IEEE, 2014.
- [9] Mhd Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. Development of mutual teleexistence system using virtual projection of operator’s egocentric body images. In *Proceedings of the 25th International Conference on Artificial Reality and Telexistence and 20th Eurographics Symposium on Virtual Environments*, pages 125–132, 2015.
- [10] MHD Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Kai Kunze, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Metaarms: Body remapping using feet-controlled artificial arms. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 65–74, 2018.
- [11] MHD Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Reo Matsumura, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Fusion: full body surrogacy for collaborative communication. In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, pages 1–2. 2018.
- [12] Anthony Tang, Omid Fakourfar, Carman Neustaedter, and Scott Bateman. Collaboration in 360 videochat: Challenges and opportunities. Technical report, University of Calgary, 2017.

日本バーチャルリアリティ学会研究報告

VR 学研報 Vol.25, No. TX01

第 15 回テレイグジスタンス研究会

©2020 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)

発行者 日本バーチャルリアリティ学会

〒162-0801 東京都新宿区山吹町 358-5 アカデミーセンター

TEL 03-6824-9376 / FAX 03-5227-8631

e-mail office@vrsj.org

The Virtual Reality Society of Japan

Academy Center, 358-5 Yamabuki-cho, Shinjuku-ku,

Tokyo, 162-0801 Japan

禁無断転写・転載