

人の身体性を遠隔地で表現する 複数の環境ロボット型テレプレゼンスシステム

志摩 幸隆¹ 高嶋 和毅^{1,a)}

概要：本研究では、環境にもともと存在する家具をモジュールロボット化することで、遠隔話者の身体性を等身大で表現し、存在感など豊かな非言語的コミュニケーションを実現する新しいテレプレゼンスシステムを提案する。このシステムは、移動や変形機能を有する複数の環境ロボットと動的プロジェクションマッピングを活用し、遠隔話者の胴体や手の動きを実寸で再現することで、あたかも現地に存在するかのような体験を提供する。また、使用後に家具として元の形態に戻るため、環境の柔軟性やコスト効率が高い点も特徴である。本発表では、提案手法を用いて、遠隔交流、遠隔ソーシャルタッチ、共同作業などのアプリケーションシナリオの可能性を議論する。

1. はじめに

コミュニケーションにおいて身体性は重要な要素の一つである。しかし、一般的なビデオカメラに基づくリモートコミュニケーションでは、遠隔話者の手の動き、身長や体の方向といった身体の情報を実体的に伝送できないため現地で実在感を表現することが難しい。また、身振り手振り（ジェスチャー）などの基本的な非言語情報も伝えづらく、コミュニケーションの質も低下する。そのような遠隔コミュニケーションの本質的な課題を解決するため、ロボットを活用して遠隔話者の実在感や存在感を伝送する研究が活発に行われている。代表例として、ヒューマノイドロボットを用いたものがあり、人の形をしたロボットの筐体によって遠隔話者の存在を等身大で表し、話し声や顔などの情報に加えて、様々なアクチュエータを駆使することによって、腕や指などの詳細な身体動作を伝達・表現することができる（例は多岐にわたるが、例えば Telesar シリーズなど [7]）。遠隔話者の身体の動きだけではなく、その外見を完全に模倣することで、現場での存在感をより高めるアプローチもある（例えば、[4]）。しかし、これらのアプローチでは、ロボットの準備に大きなコストがかかるという課題がある。

その他のアプローチとして、コミュニケーションに重要な要素のみを物理的に表現する遠隔コミュニケーションロボットがある。例えば、相手の身長は、年齢や個性を表すのみではなく、アイコンタクトや表情理解に重要な視線の

高さを決定する重要な要素である [1]。ScalableBody[6] は、リニアアクチュエータの先端に取り付けたカメラを用いて遠隔話者の身長や視線を自由に設定・調整することができる。他にも、遠隔話者の身振り手振りやジェスチャーなどを正確に伝送することも必要であり、Physical Telepresence[5] は、多数の上下昇降アクチュエータを組み合わせることで遠隔話者の手や腕の動きを物理的に再現することで、より自然な触覚フィードバックや協調的なオブジェクト操作を可能にしている。さらに、HoloBots[3] では、AR グラスを介して投影されるホログラムと連動し、小型ロボットを移動させることで触覚提示を可能にしている。これにより、従来の空間映像では実現できなかった「ホログラム」と「物理的アクション」の2つの性質を統合することが可能となり、遠隔地の人間とのコミュニケーション手段の選択肢が大きく広がった。そして、Swarm Body[2] では、小型ロボット群を連携稼働させて、人（遠隔話者）の手のひらの運動を模倣し、じゃんけんや物体運搬などを現地空間にて物理的に実現している。これらの研究では、実際に物理的な筐体を持つロボットが協調して動作することで、遠隔話者の動きを視覚的に表現するだけでなく触覚提示もできる点や、群ロボットによって多様な運動を柔軟に再現できることなどが特徴である。また、これらの研究は、本来人の形をしていないロボットに運動や変形を導入することで、人の身体であるかのように見せる試みでもある。この考えを用いると、環境に偏在する様々な人型ではないロボットを再利用できることになり、準備面でのメリットは大きく、ロボットの数が増えれば拡張性や柔軟性に優れると考えられる。しかし、現状では、人の身体よりかなり小型のロボット群

¹ 芝浦工業大学 システム理工学部

^{a)} takashim@shibaura-it.ac.jp

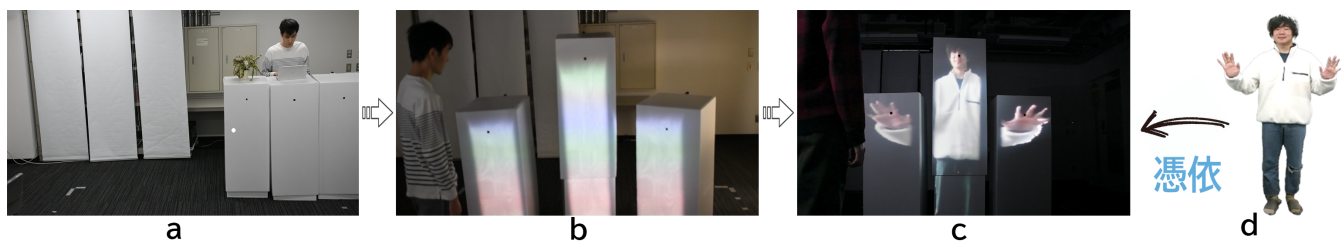


図 1 複数の環境ロボットを用いたテレプレゼンスシステム

を用いる取り組みが多く、遠隔話者の身体性を等身大で表現してその存在感を現地で表現する試みはなされていない。

そこで本研究では、環境にもともと存在する家具をモジュールロボット化し、それを用いて遠隔話者の身体性を現地にて等身大で表現し、豊かな非言語的コミュニケーションを実現するテレプレゼンスシステムを提案する。このシステムでは、移動や変形機能を有する複数の環境ロボットに対して動的プロジェクションマッピングを適用し、遠隔話者(図 1(d))の胴体や手の動きを視覚と実体で再現することため、あたかも遠隔話者が現地に存在するような体験を提供する。現地のユーザから見ると、その環境や場に存在する家具に遠隔話者が乗り移った(憑依した)かのようになり、その話者と同一空間で対面しているようなインタラクションを体験することができる(図 1(c))。また、遠隔コミュニケーション終了後に家具として元の形態に戻るため、環境の柔軟性やコスト効率が高い点も特徴である。現時点では、ロボット型家具は依然として広く展開されていないが掃除機や配膳台車を始め普及期に差し掛かっていると言える。そして近未来の住宅やオフィスには移動機能や変形機能を有する家具や什器で溢れていると想定している。本研究では、提案手法を実現するにあたっての設計と実装について報告し、そのプロトタイプを用いて、遠隔交流、遠隔ソーシャルタッチ、共同作業などの応用シナリオの可能性を議論する。

2. デザイン

2.1 目的とコンセプト

図 1 に、本研究のコンセプトを示す。本研究は、日常生活に遍在する家具をモジュールロボット化して活用することで、特別な装置や専用空間を設けることなく、遠隔話者の身体性を簡便に表現することを目的としている。例えば、図 1(d) の遠隔話者の身体がネットワークを介して図 1(a) に示す複数のモジュールロボットに「憑依」させ、遠隔話者の胴体や手の動きに連動させてそれぞれのモジュールロボットを移動・変形(図 1(b)) させることで、その身体性を現地で物理的に再現する。ただし、移動と変形だけでは表現能力に限りがあり、将来の智能化空間では様々な SAR 技術 (Spatial Augmented Reality) も偏在すると予想し、遠隔話者の映像もロボットにプロジェクションし正

確な身体性を実寸で表現する(図 1(c))。これが完全に実現すれば、例えば、遠隔話者は、ロボット群をアバタとして用いて、対象の空間内を自由に動き回ることができたり、他者との適切な陣形や対人距離を形成できたりする。その他、現地に胴体や手のアバタを物理的に置くことができる点を活かして、握手やハグといったソーシャルインタラクションだけでなく、物体運搬や情報共有をすることまでも可能となる。

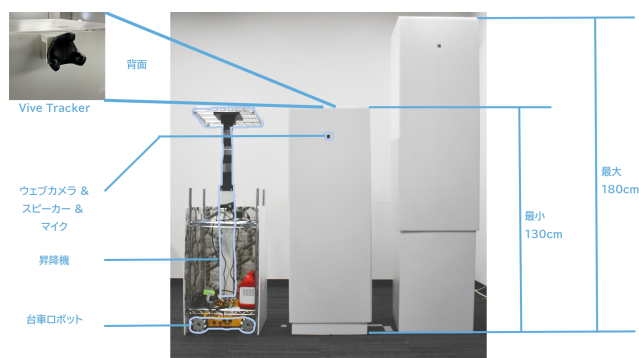


図 2 モジュールロボット設計

2.2 モジュールロボットの設計

本研究では、モジュール化された複数のロボットを想定する。これは、住宅やオフィスなどでは同じ机や椅子やモニタが並んでいる一般的なレイアウトを有効活用したいと考えたからである。本研究では、人の身体性の代表的な身長を表現する必要があるため、ロボットの高さを 130cm から 180cm まで調整可能なものとし、幅および奥行きはそれぞれ 50cm に設計した。図 2 の中央と右側に示す 2 体のロボットは、それぞれ最低と最高の高さ状態を示している。これは、最低の高さの形態であれば 130cm のハイテーブルと同程度のサイズ感であり環境に馴染むが、一度遠隔話者が憑依すれば、それぞれのロボットモジュールとして人の胴体(身長や顔の高さ)や両手を 180cm の高さまで実寸大で表現することになる。

先に述べた通り、このモジュールロボット単体ではディスプレイ機能を持たない。それぞれの身体部位の役割を明確に表現するためにも、本研究では、環境側に設置したプロジェクターから映像を投影する方式を採用した。ロボッ

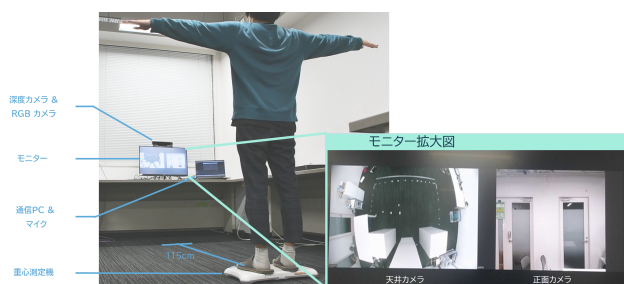


図 3 遠隔側側のセットアップ

トの移動や位置情報は逐一システムに管理されるため、その情報に基づいて面に対する動的プロジェクションマッピングを実施し、図 1(c) に示すように、遠隔話者の身体をリアルに表現する。

2.3 表現する身体部位

本研究では、モジュールロボット 3 台で一人の身体を表現する。一例として、1 台で頭部を含む胴体を、残り 2 台で両手を表現する。ロボットモジュールの個数が多ければ多いほど滑らかな身体表現が可能になるが、ロボット同士の連携などが複雑になる上に、全身を対象としたアバタへの身体化や主体感研究において、どれだけの部位を再現すればコミュニケーションに効果的か判明していないため、感情や非言語、体の動きなどを明確に伝えられる部位をまず検討する。顔は表情伝達に重要であり、胴体、特に身長は、体の特徴を明確にし、存在感をその空間で示すのに重要であると考えた。両手もジェスチャなどに加えて感情表現において極めて重要な部位であるため取り上げた。なお、胴体と手は通常連結するが、モジュールロボットの胴体と手の独立した動作を取り入れれば、身体の制約を超えた新たなインタラクションも可能となる。

2.4 安全性

この等身大のモジュールロボットは質量が大きく強い運動エネルギーを持つ為、ユーザーとの衝突がないようにつ安心して使用できるよう、安全性に配慮した設計が行われている。一つはこれまでテーブルであったものが突如ロボットに変形し移動することで使用者が驚いたり不審さを抱かないような配慮をまず考えた。具体的には、ディスプレイに表示されるコンテンツを工夫し、table mode から embody mode 間に遷移するアニメーションを用意することでテーブルから人間へ変化する様を明確に表現した (図 1(b))。

3. 実装

3.1 ハードウェア

本システムのモジュールロボットの内部機構は図 2 に示す。まず、ロボットの全方位置動を実現するために Nexus

Robot を採用した。モーターの無線通信には ESP32 を用い、Nexus Robot 内部では、Arduino Atmega328 が ESP32 と通信し、4 輪のモーターを制御する。ロボットの位置トラッキングには、HTC Vive Pro 2 の Vive Tracker 3.0 を用いた。電動の昇降機構はそれとは別の ESP32 によって無線で制御されている。ロボットの正面には $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ の正方形の開口部があり、ここに Android 端末を設置しそのカメラにより外部を撮影できるようにした。このカメラは音声および映像の送受信に使用され、ビデオコミュニケーション機能を利用できる。プロジェクターには BenQ TK700STi 4K 短焦点ゲーミングプロジェクターを用いた。モジュールロボット三台の稼働範囲全面に映像投影できる位置に設置されている。

遠隔側のセットアップを図 3 に示す。遠隔話者にあたるユーザーの身体運動は Kinect v2 を使用して骨格情報をキャプチャする。前進・後退および左右移動の動きは、Wii Balance Board を利用して重心方向を測定して制御する。

3.2 ソフトウェア実装

ロボット制御のソフトウェアは Unity で構築されており、各ロボットの ESP32 との Bluetooth で通信する。Unity のソフトウェアでは、遠隔話者の骨格情報とモジュールロボットの現在地から算出された進行方向をリアルタイムでモジュールロボットに送信することで、Nexus ロボットを制御している。モジュールロボットに映像を投影するダイナミックプロジェクションマッピングには TouchDesigner というノードベースのビジュアルプログラミング環境を使用した。

ダイナミックプロジェクションマッピングでは、物理空間のプロジェクターの光軸とバーチャル空間のカメラの光軸を正確に一致させる必要がある。本研究では、投影対象の形状データを取得し、逆算的にバーチャル空間内のカメラ位置を推定する TouchDesigner の内部ツール「camShnapper」を利用することで、高速かつ精密なキャリブレーションを実現した。Unity と TouchDesigner 間は OSC (Open Sound Controll) 通信を利用し、Vive Tracker の位置情報を TouchDesigner に送信することで、ロボットの位置とプロジェクタの投影映像を同期した。プロジェクターでの投影内容は、Kinect 内部にある RGB カメラで取得した胴体と両手の映像をリアルタイム処理したものであり、その情報は WebRTC 通信を通じて現地に送信される。

遠隔側のシステムも同様に Unity と TouchDesigner を動作させており、センサー情報の収集およびローカル側との連携を行う。3 で示した遠隔側のセットアップに示した深度センサーで取得された骨格データ (頭部および両手の位置・回転) は TouchDesigner で管理される。また重心測定機で測定された位置は Unity で管理される。これらの情報は UDP 通信を通じてローカル側の Unity に送信され、ロ

ボットを操作する動作として処理される。

また、ローカル側の Android 端末と遠隔側の PC の音声・映像の送受信にはオンラインビデオ会議ツールの Zoom を活用している。

3.3 ロボット制御

ロボットの制御モードは、以下の 2 つに分類される：

(1) table mode

ロボットの初期セットアップや、身体表現を終了した後に環境内に再配置する際に使用される。Unity 上であらかじめ定義された位置に向かって PID 制御を行い、正確に並列配置を実現する。また、複数ロボット間での衝突を防ぐため、衝突回避アルゴリズム RVO (Reciprocal Velocity Obstacles) を採用して、リアルタイムで移動方向をシミュレーションしている。

(2) embody mode

Kinect から取得した頭部および両手の位置・回転情報をリアルタイムでロボットにマッピングする。移動制御には、対象位置と現在位置の差分をベクトルとして算出するシンプルなアルゴリズムを使用している。対象位置には、Kinect により取得した頭の位置と両手の位置の水平情報から Unity のワールド座標系へ変換した値に毎フレームごとに更新を行う。

4. アプリケーションシナリオ

本システムの特徴である身体性の再現と柔軟なモジュール性を活用したアプリケーションシナリオを提案する。これらのシナリオは、リモートコミュニケーションや空間インタラクションにおける新たな可能性を示すものであり、主に、遠隔話者の立ち位置やジェスチャー、触覚など非言語的表現に焦点を当てる。本研究のデモは、当日のプログラムのデモセッションにて紹介する予定である。

4.1 リモート交流での立ち位置の明示化

リモートでの交流において、複数の人々が適切な陣形を形成することはコミュニケーションを円滑にするための重要な要素である。本システムでは、遠隔地のユーザーが自身の身体性を現地のロボットに投影することで、対話相手との距離感や視線の方向を物理的に表現する。例えば、対話中にロボットを移動させて相手に近づいたり、別の方向を向くことで、非言語的なメッセージを効果的に伝えることが可能である。このアプローチは、オンラインミーティングやディスカッションの際に、参加者間の空間的な関係性をより直感的に示すことが可能であり、意思疎通や一体感の向上に寄与する。

4.2 ソーシャルタッチ

ソーシャルタッチを通じて、リモート環境での心理的な

距離を縮め、親密さや安心感を伝えることが可能である。本システムは、例えば、ロボットが肩や腕に軽く触れることで、発言の合図や安心感を与えることができる。他にもタッチ動作ができるため、チーム内での祝福や応援のメッセージを伝えることが可能である。

参考文献

- [1] Rita Gorawara-Bhat, Mary Ann Cook, and Greg A Sachs. Nonverbal communication in doctor-elderly patient transactions (ndep): development of a tool. *Patient education and counseling*, 66:223–234, 5 2007.
- [2] Sosuke Ichihashi, So Kuroki, Mai Nishimura, Kazumi Kasaura, Takefumi Hiraki, Kazutoshi Tanaka, and Shigeo Yoshida. Swarm body: Embodied swarm robots. *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–19, 2024.
- [3] Keiichi Ihara, Mehrad Faridan, Ayumi Ichikawa, Ikkaku Kawaguchi, and Ryo Suzuki. Holobots: Augmenting holographic telepresence with mobile robots for tangible remote collaboration in mixed reality. *Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 1–12, 2023.
- [4] Hiroshi Ishiguro. ジェミニノイド hi-6. <https://www.irl.sys.es.osaka-u.ac.jp/projects/geminoid>, 2023. 2025-01-16.
- [5] Daniel Leithinger, Sean Follmer, Alex Olwal, and Hiroshi Ishii. Physical telepresence: Shape capture and display for embodied, computer-mediated remote collaboration. *UIST 2014 - Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 461–470, 2014.
- [6] Akira Matsuda, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Scalablebody: A telepresence robot that supports face position matching using a vertical actuator. *In Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference (AH '17)*, Article 13, page 1–9, 2017.
- [7] Susumu Tachi, Yasuyuki Inoue, and Fumihiro Kato. Tele-sar vi: Telexistence surrogate anthropomorphic robot vi. *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 17, No. 5, pages 1–33, 2020.