

物理的提示とAR提示を併用するハイブリッド型ロボットにおける頭部と腕部の提示方法の違いによる影響

川口 一画^{1,a)} 井原 圭一¹ 市川 あゆみ¹ 佐方 葵¹ 守 新太郎¹

受付日 2023年6月16日, 採録日 2023年12月11日

概要: ビデオ通話は非言語情報の伝達に課題があり, 特に空間的な参照の伝達が困難となる. これに対し, 遠隔操作可能なロボットや Augmented Reality (AR) 技術を用いた非言語情報伝達が提案されているが, それぞれ課題が残されている. そこで本研究では, 物理的な身体部位と AR により提示される仮想的な身体部位を組み合わせたハイブリッド型ロボットに着目した. そして空間的な参照と存在感の伝達に適したハイブリッド型ロボットの設計指針を得るため, 頭部と腕部について物理的な提示と AR 提示を切替えられるロボットを実装し, 各身体部位の物理的な提示と AR 提示を組み合わせた 4 条件で比較実験を実施した. 実験結果より, 頭部の物理的な提示が空間的参照と社会的存在感の伝達に重要であること, 腕部の物理的な提示が指差しの伝達に重要であることが示された.

キーワード: コミュニケーションロボット, 非言語情報, AR(拡張現実), 空間的参照, 社会的存在感

Hybrid Robot with Physical and AR Body Presentations: Effects of Different Presentation Modalities for Head and Arms

IKKAKU KAWAGUCHI^{1,a)} KEIICHI IHARA¹ AYUMI ICHIKAWA¹ AOI SAKATA¹ SHINTARO MORI¹

Received: June 16, 2023, Accepted: December 11, 2023

Abstract: Video calls have challenges in conveying nonverbal information, particularly in transmitting spatial references. Various approaches have been proposed, such as remotely operated robots and Augmented Reality (AR) techniques for transmitting nonverbal information, but each approach has limitations. This study focuses on the hybrid robot that combines physical body parts with virtual body parts presented through AR. To obtain design guidelines for hybrid robots that effectively convey spatial references and a sense of presence, we implemented a system that can switch the physical and AR-based presentations for the head and arms. We conducted a comparative experiment using four conditions combining physical and AR presentations for each body part. The experimental results demonstrated that the physical head is crucial for conveying spatial referencing and social presence, while the physical arms are vital for conveying pointing gestures.

Keywords: communication robot, non-verbal information, augmented reality, spatial reference, social presence

1. はじめに

非言語情報 [1] とは, 言葉の持つ意味情報以外のすべての情報であり, コミュニケーションにおいて重要な役割を果たす. しかし, 遠隔コミュニケーションの手段として広

く普及しているビデオ通話では非言語情報の伝達が困難であることが知られており [2], 遠隔地からビデオ通話を介して現地側のインタラクションに参加する場合には齟齬が生じる [3]. その原因として, ビデオ通話では非言語情報を用いて実空間の人や物への空間的な参照を伝達する (視線を向ける, 指さす等) ことが困難であること [4], またビデオ通話では対面よりも存在感が低下すること [5] が挙げられる. ここで, 空間的参照は主に展示案内のように何ら

¹ 筑波大学

University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

^{a)} kawaguchi@cs.tsukuba.ac.jp

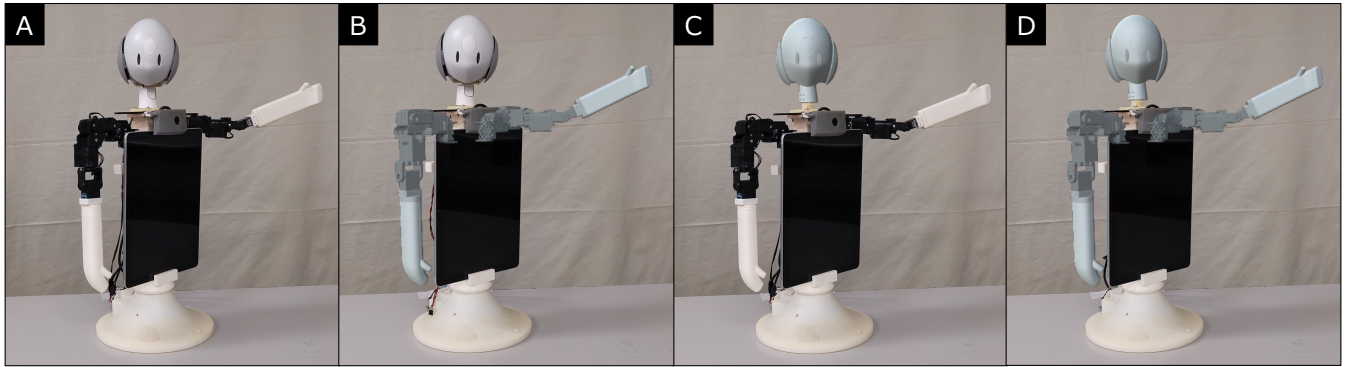


図 1 4つの比較条件の外観:(A) 両方物理条件,(B) 頭物理-腕 AR 条件,(C) 頭 AR-腕物理条件,(D) 両方 AR 条件.

Fig. 1 Appearance of four conditions:(a)both physical,(b)physical head and AR arms,(c)AR head and physical arms,(d)both AR.

かの対象物が焦点となるインタラクションで重要となるのに対して, 社会的存在感の伝達は主に面談など対話相手との会話自体が焦点となるインタラクションにおいて重要となる. 一方で, 学会等におけるポスター発表のように, 対象物の説明と相手との対話がシームレスに移行する状況では, 空間的参照と社会的存在感の双方が重要となる.

ビデオ通話における空間的参照および存在感の伝達の課題に対して, 遠隔操作可能なロボットを用いて非言語情報を伝達する手法が提案されている. 具体的には, ディスプレイの回転により注視方向を伝達するテレプレゼンスロボット [6], [7], [8] や, 人間の身体部位の一部(頭部や腕部等)もしくは全身を再現し非言語情報を伝達するロボット [9], [10], [11], [12], [13] などである. ロボットを用いる手法では, より人間に近い身体性を有することで高度な非言語表現が可能になり, 空間的参照の伝達や存在感の向上に有利である. 一方で, 構成が複雑になると設計や実装, メンテナンス等にコスト(費用, 人的リソース)がかかる.

この課題に対して, Augmented Reality (AR) 技術を用いてロボットの身体性を拡張する手法が提案されている. 具体的には, 既存のテレプレゼンスロボットやアーム型ロボットに対して, 人間の全身を再現した CG アバタを重畳表示する手法が提案されている [14], [15]. これらのシステムでは, 人間の全身を再現した CG アバタを用いて高度な非言語表現を容易に提示することが可能である. 一方で, これらの研究で用いられている光学シースルー式の AR デバイスでは, 視野角や解像度, 輝度等の制約から, 肉眼で実物体を見る場合と比較して視認性や存在感に課題が生じる.

この課題に対して, 実体を持った物理的な身体部位と, AR により重畳提示される仮想的な身体部位を組み合わせたロボットが提案されている [16], [17]. 本論文では, このような構成のロボットを「ハイブリッド型ロボット」と定義する. ハイブリッド型ロボットは, 物理的な身体部位が AR デバイスの視野角等の制約によらず表示され続けることから, 全身を AR 提示する場合よりも視認性や存在感の

課題を改善することが期待される. また, 物理的なロボットを用いる場合に課題となる設計や実装, メンテナンス等のコストの課題も, 一部が AR 提示に代替されることで改善が期待される.

ただし, 先行研究においては AR 提示を適用した身体部位が腕部だけであり, 他の身体部位について検討が行われていない. また, AR 提示の効果の評価として, AR 提示の有無で比較実験を行っており, 同じ身体部位を物理的に提示する場合と AR 提示する場合の比較は行われていない. そのため, ハイブリッド型ロボットを適切に設計するための十分な知見は得られていない.

本研究では, 実空間への空間的な参照を伝達する遠隔コミュニケーションシステムを実現するための手段として, ハイブリッド型ロボットに着目する. そして空間的な参照と存在感の伝達に適したハイブリッド型ロボットの設計指針を得るため, AR 提示の対象とする身体部位を頭部と腕部に拡張するとともに, 各身体部位について物理的な提示と AR 提示を切替えられるようロボットを設計し, 提示方法の違いによる影響を比較実験により調査する.

本研究の貢献は以下の3点である.

- 頭部と腕部を対象とし, 各部位について物理的な提示と AR 提示を切替えられるロボットを開発した.
- 開発したロボットを用いて, 頭部と腕部について物理的な提示と AR 提示を組み合わせた4条件で比較実験を実施した.
- 実験結果より, 空間的な参照と存在感の伝達に適したハイブリッド型ロボットの設計指針を示した.

本論文ではまず, 関連研究として, ビデオ通話における非言語情報伝達の課題と, 非言語情報を伝達するコミュニケーションロボット, および AR 技術を用いた非言語情報提示に関する研究を紹介し, 本研究の指針を述べる. 次に, 実装したシステムの詳細, およびシステムを用いた評価実験について述べる. 最後に, 評価実験の結果考察とそこから導かれるハイブリッド型ロボットの設計指針について述べる.

2. 関連研究

2.1 ビデオ通話における非言語情報伝達の課題

ビデオ通話では非言語情報の伝達が困難であることが知られている [2]. 特に、非言語情報を用いて実空間内の人や物への参照を伝達する（視線を向ける、指さす等）ことが困難である。対面でのコミュニケーションにおいて、参照の伝達は重要な役割を果たすことが知られている。例えば、進行中の会話において、参加者は相互に視線を伝えあうことで、自身の会話への参与を示したり、相手の会話への参与を確認したりする [18]. 参加者間での相互注視 (mutual gaze) は、互いが会話へ参与していることを確認するプロセスとして重要である。また、相互注視が話者交代の合図になる場合もある [19]. 何らかの対象物を含む会話では、物に対する参照の伝達も重要である。会話の参加者は、視線や指差しを用いて他の参加者に対して対象物に対する参照を伝達する。参照が他の参加者に適切に伝達されると、他の参加者も同じ対象物に視線を向け、共同注意 (joint attention) が達成される [20]. 何らかの対象物を含む会話（資料の説明など）においては共同注意の達成が重要である。ビデオ通話では、ここまで述べた非言語情報を用いた実空間内の人や物への参照の伝達が困難である。結果として、遠隔地からビデオ通話を介して現地側のインタラクショナルに参加する場合に齟齬が生じ、現地側の参加者と比べて参与が限定的になる [3].

2.2 物理的に非言語情報を伝達するコミュニケーションロボット

通常のビデオ会議における非言語情報伝達の課題に対して、コミュニケーションロボットを用いて物理的に非言語情報を伝達する手法が提案されている。市販されている kubi[6] に代表されるディスプレイ回転型のテレプレゼンスロボットは、遠隔参加者の顔映像が映ったディスプレイを回転させる動作により、遠隔参加者の視線を伝達することができる。ただし、平面のディスプレイ上に映った映像はモニリザ効果等の原因により注視方向が正確に伝わらないこと [11], またディスプレイの回転だけでは遠隔参加者の存在感が十分に伝達されないこと [8] が課題となる。

ディスプレイの回転以外に、より人間に近い身体部位を付与して非言語情報を伝達する手法も研究されている。著者らの先行研究 [11] では、ディスプレイの回転の代わりにヒューマノイド型のロボット頭部を付与して視線を提示することで、ディスプレイの回転による視線の提示よりも目が合う感覚や存在感が向上することを示した。Adalgeirssonらは、ディスプレイの回転による視線伝達に加えて、遠隔操作可能な腕を用いた非言語情報提示が可能な Mebot[12] を提案した。同様に、ロボットの腕を用いて非言語情報を伝達可能なシステムとして、Gestureman[10] や PopArm[9]

が提案されている。さらに、Telesa V[13] の様により人間に近い身体性を再現し、高度な非言語情報提示を提示可能なシステムも開発されている。物理的に非言語情報を伝達する上では、より人間に近い身体性を有することで高度な表現が可能になる。一方で、構成が複雑になることにより、設計や実装、メンテナンス等にコスト（費用、人的リソース）がかかる。

2.3 AR 技術を用いた非言語情報提示

近年、Hololens 2 に代表される MR/AR デバイスの入手が容易になっており、CG アバタを実空間に重畳表示して非言語情報を伝達する研究が行われている。VROOM[14] は、市販の移動型テレプレゼンスロボットに対して、リモートユーザの外観を反映した CG アバタを重畳表示することにより、高度な非言語情報伝達が可能である。同様に、カメラを設置したロボットアームに対し人型の CG アバタを重畳表示するシステムの提案も行われている [15]. このような CG アバタを用いるアプローチでは、AR デバイス導入の費用が必要になるものの、ロボットの各身体部位を物理的に提示するよりも、容易に設計・実装・運用が可能であると考えられる。一方で、現在市販されている一般的な AR デバイスでは、視野角や解像度、輝度等の制約から、肉眼で実物体を見る場合と比較して視認性や存在感に課題が生じる。

この課題に対して、ロボットの物理的な身体部位と、AR デバイスを介して提示される仮想的な身体部位を組み合わせる非言語情報の提示を行うシステムが提案されている。Groechel らは、限られた非言語情報しか提示できないシンプルなロボットに対して、AR により CG の腕を付与し表現力を拡張するシステムを提案した [16]. 同様に、井上らは頭部のみを有するトレイグジスタンスロボットに対して、AR により CG の腕を付与するシステムを提案した [17]. このような、物理的に提示される身体部位と AR により提示される仮想的な身体部位を併用するハイブリッド型ロボットは、物理的な身体部位が AR デバイスの視野角等の制約によらず表示され続けることから、全身を AR 提示する場合よりも視認性や存在感の課題が改善されることが期待される。また、物理的なロボットを用いる場合に課題となる設計や実装、メンテナンス等のコストの課題も、一部が AR 提示に代替されることで改善が期待される。ただし、先行研究においては AR 提示を適用した身体部位が腕部だけであり、他の身体部位については検討が行われていない。また、AR 提示の効果の評価としては、AR 提示の有無での比較実験だけが行われており [16], 同じ身体部位を物理的に提示する場合と AR 提示する場合の比較は行われていない。そのため、ハイブリッド型ロボットを適切に設計するための十分な知見は得られていない。

なお、ロボットの身体部位の提示方法を切替え、影響を

調査した先行事例として、田中らは、物理的ロボット、対面の人間、ディスプレイに表示された CG アバタ、ディスプレイに表示された人間の映像等の条件で遠隔対話を行う実験を行い、物理的な実体がソーシャルテレプレゼンスを向上させることを示している [5]。また、大西らは、ディスプレイに表示された人間の映像の腕部分をロボットアームとして物理的に提示することで、指差しの伝達やソーシャルテレプレゼンスが向上することを示している [21]。これらの研究は、ロボットの物理的な実体を用いた情報提示の効果に着目し、物理的な実体を用いることで、2次元映像と比較して存在感（ソーシャルテレプレゼンス）や参照の判別性が向上することを示している。ただし、これらの研究で用いた比較対象は、ディスプレイに提示された2次元映像であったことから、本研究で着目する AR 提示と物理的な実体を比較した場合の影響は明らかになっていない。

2.4 本研究の指針

本研究では、ビデオ通話において伝達が困難となる非言語情報として、実空間内の人や物への参照に着目し研究を行う。そして、既存のコミュニケーションロボットもしくは AR を用いた非言語情報提示手法の課題を解決するため、物理的に提示される身体部位と AR により提示される仮想的な身体部位を併用するハイブリッド型ロボットに着目する。そして空間的参照と存在感の伝達に適したハイブリッド型ロボットの設計指針を得るための調査研究を行う。そのための具体的な指針として、以下の2点を設定する。

- AR 提示の対象とする身体部位として、空間的な参照の伝達において重要な役割を果たす頭部と腕部に着目する。
- 各身体部位について物理的な提示と AR 提示を切り替えられるロボットを実装し、比較実験により提示方法の違いによる影響を調査する。それにより、ハイブリッド型ロボットの設計指針を得る。

3. システム

本研究では、空間的参照と存在感の伝達を目的としたハイブリッド型ロボットの設計指針を得ることを目的に、頭部と腕部について物理的な提示と AR 提示を切り替えることが可能なシステムを実装した。本章では実装したシステムの詳細を述べる。なお、本章で説明するシステムは、著者らの先行研究 [22] にて提案したシステムを元に、実験のためのスクリプト自動再生機能を追加したものとなっている。

本研究で実装したシステムは、ロボット、Hololens 2、および制御用 PC から構成される。ロボットは著者らの先行研究 [11] にて実装したヒューマノイド型頭部を付与したテレプレゼンスロボットを拡張し実装した。ロボットの外観を図 2 に示す。ロボットは pan-tilt の 2 自由度を有する頭部と、片腕あたり肩 3 自由度と肘 1 自由度を有する腕部、お



図 2 ロボットの外観

Fig. 2 Appearance of the robot.

よび pan の 1 自由度を有する土台部分から構成される。頭部および腕部は、それぞれ独立して着脱可能な機構とした。それぞれの関節はサーボモータにより動作する。各サーボモータは、胴体部に設置した Surface Go 3 (10.5-inch, intel Core i3, 8GB RAM) からのシリアル通信により制御される。また、各関節の角度は、制御用 PC から UDP 通信により受信した情報が反映される。制御用 PC との通信、およびモータとのシリアル通信を行う制御プログラムは、python で実装し Surface Go 3 上で実行した。

Hololens 2 は頭部および腕部をロボット上に AR 提示するために用いる。Hololens2 の解像度は片目あたり 1440x936 (47px/deg) であり、システム実行時のフレームレートは 60fps であった。AR 提示のためのソフトウェアは Unity 上で実装されており、Microsoft 社が提供する Holographic Remoting Player を用いて Hololens 2 上で再生される。AR 提示される頭部および腕部のデータは、物理的なロボットの实装に用いた CAD データをインポートし使用した。インポートしたデータは頭部と腕部を合わせて全体で約 20 万ポリゴンであった。各関節の角度は、制御用 PC から UDP 通信により受信した情報が反映される。また、Microsoft 社が提供する MRTK を用いて、実験にてタスク実行中のユーザの視線方向を記録する機能を実装した。

制御用 PC には、G-Tune (Intel Core i7-11800H 2.30GHz CPU, NVIDIA GeForce RTX 3070 Laptop GPU, 64GB RAM) を用いた。制御用 PC 上では、ロボット本体もしくは Hololens 2 上で AR 提示される身体部位の動作を制御するため説明スクリプト再生プログラムが実行される。実装したスクリプト再生プログラムは、ロボット本体もしくは Hololens 2 上の AR 提示を制御するための UDP 通信機能と、4 章で説明する実験のため、事前に設定した一連の動作とあらかじめ録音した音声を再生する機能を python で実装した。システム全体の構成を図 3 に示す。

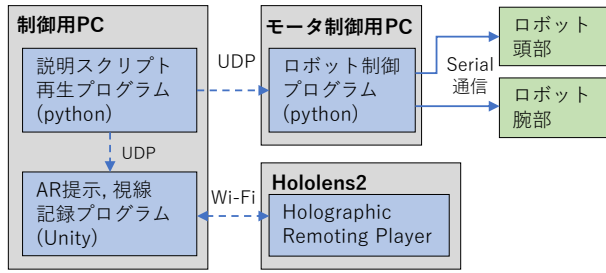


図 3 システム構成

Fig. 3 System configuration.

4. 実験

本章では、空間的な参照が必要となる資料の説明タスクを対象として、頭部と腕部の提示方法の違いによる影響を評価するために実施した実験について説明する。なお、本実験は筑波大学システム情報系の倫理審査委員会の承認を受け実施した。

4.1 実験概要

実験では、3章で説明したシステムを用いて、遠隔操作者（実験者）が1名の実験参加者に対して実空間内に配置された2枚の資料の説明を行うタスクを設定した。なお、モータ音の影響を軽減するため、説明音声はノイズキャンセリング機能を有するヘッドセット（Sony WH-1000XM4）を介して提示した。実験環境を図4に示す。実験環境において、実験参加者から見た資料A - ロボット間の角度は約37度であったのに対し、Hololens 2の視野角は対角で約52度であることから、資料を見る際にはロボットがAR提示の範囲外となる。なお、Hololens2は表示領域外に視界の遮蔽物が無い解放型であることから、物理的なロボットは周辺視野においても視認することが可能である。

タスクでは、あらかじめ設定した一連の動作および録音音声を用いて、2枚の資料についての説明を行った。実験参加者に対しては、事前に以下の内容を教示した。

- 本実験では、ヘッドマウントディスプレイと物理的なロボットにより構成される遠隔対話システムを介して、遠隔参加者と対話を行っていただきます。
- タスクでは、遠隔対話者がホワイトボードに貼られた2枚の資料について紹介しますので、説明を聞いてください。
- 説明後、遠隔対話者が質問をするので、口頭で回答してください。

本実験で用いた2枚の資料は特定の県の2種類のお土産品の写真であり、それぞれの名前、特徴、および値段についての説明を行った。なお、本実験は参加者内配置の4条件（詳細は4.2節にて説明）としたことから、4つの県のスクリプトを用意した。説明後、システムは実験参加者に2種

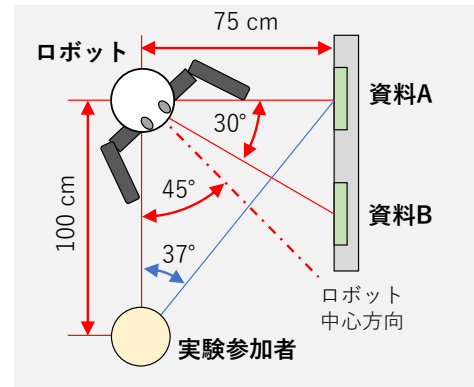


図 4 実験環境

Fig. 4 Experimental setup.

類のお土産品のどちらが良いかを質問し、実験参加者には、どちらを選んだか、およびその理由について口頭で回答させた。タスク中のシステムの非言語情報提示内容は、腕部を用いた資料に対する指差し、頭部を用いた資料および参加者への視線提示、実験参加者の回答に対する相槌の提示とし、各スクリプトの動作内容を統一した。具体的な動作内容は以下のとおりである。

(1) 導入

- 腕を下げ頭部を実験参加者に向けた状態で説明を開始
- 頭部と腕の両方を順番に資料A、資料Bに向ける
- 腕を下げ頭部を実験参加者に向ける

(2) 資料Aの説明

- 頭部と腕の両方を資料Aに向け説明を開始
- 腕は資料Aに向けたまま、発話の区切りのタイミングで頭部を実験参加者に向ける（3回）
- 腕を下げ頭部を実験参加者に向ける

(3) 資料Bの説明

- 頭部と腕の両方を資料Bに向け説明を開始
- 腕は資料Bに向けたまま、発話の区切りのタイミングで頭部を実験参加者に向ける（3回）
- 腕を下げ頭部を実験参加者に向ける

(4) 質問

- 腕を下げ頭部を実験参加者に向けた状態で資料Aと資料Bのどちらが良いかを質問
- 実験参加者の発言に合わせて、頭部を選択された資料に向ける
- 頭部を実験参加者に向け、選択の理由を質問
- 実験参加者が理由を説明している最中に2回うなずきを行う
- 最後に「ありがとうございました」という発話とともにうなずきを1回行う

各資料に対して視線を向ける、もしくは指差しを行う際には、各資料の中心点に頭部、もしくは腕部を向ける設定とし、各資料中の特定の部位の参照は行っていない。一連の説明、および回答に要する時間は平均で80.61秒

($SD = 8.72$) であり、各試行における回答内容の差に起因した所要時間のバラつきが生じていた。なお、本研究は遠隔コミュニケーションにおいて実空間への参照を伝達するシステムの実装を目的としていることから、実際にシステムを遠隔操作して実験を行う方法も選択肢として検討した。しかし、今回の実験では身体部位の提示方法の違いの影響を定量的に評価することを目的としたことから、提示方法以外の発話内容や動作内容を厳密に統一するために、あらかじめ設定した説明を自動再生する方法を選択した。

実験参加者は16名とし、筑波大学の学部生・大学院生から任意で参加者を募集した。参加者の内訳は女性1名、男性15名であり、平均年齢は22.4歳 ($SD = 1.26$) であり、全ての参加者は情報系の学部・専攻に所属していた。実験は、事前説明、各条件でのタスク実施とアンケート回答、および全条件終了後のインタビューという流れで実施され、全体の所要時間は1時間程度であった。実験参加者には筑波大学の規定に基づく謝金が支給された。

4.2 実験条件

本研究では、頭部・腕部それぞれについて物理的な提示とAR提示を組み合わせた4条件を設定した。各条件の外観は図1にて示した通りである。

C1. 両方物理条件

C2. 頭物理 - 腕 AR 条件

C3. 頭 AR-腕物理条件

C4. 両方 AR 条件

なお、C1ではAR提示を行わないが、Hololens2を着用することによる影響（実験環境の視認性、身体的負担等）を統一するため、実験参加者はC1条件を含む全ての条件でHololens2を着用した。また、本条件設定では、いずれの条件においてもロボットの胴体部分（ディスプレイおよび土台）が物理的に提示されている。そのため、C4. 両方AR条件についてもVROOM[14]のようなARを中心とした表示ではなく、物理的実体とAR表示が組み合わさったハイブリッド型の提示となっている。ロボットの胴体も要因として考慮し、頭部、腕部、胴体それぞれについて物理的な提示とAR提示を組み合わせた条件設定とすることも選択肢であったが、その場合条件数が膨大になることから、本実験においては実空間への参照を提示する上で特に重要な頭部と腕部に限定した条件設定とした。

本実験は、参加者内配置の実験設計とした。各条件の順序効果と使用するスクリプトの影響を考慮し、各条件の実施順序、および各条件で使用するスクリプトをラテン方格法を用いてランダム化した。

4.3 評価項目

評価に当たっては、システムを用いた実空間への参照について評価するため、実験中の参加者の視線方向の分析と

参照の判別性に関するアンケートを実施した。視線方向の分析に当たっては、Hololens 2の視線認識機能を用いてタスク中にロボット、資料A、資料B、その他を見ていた時間を取得した。各対象を見ているか否かの判定にあたっては、ロボット、資料A、資料Bの位置に判定領域を設け、Hololens2の視線認識機能で取得されるユーザ視線のレイ（ユーザには非表示）が判定領域に当たっている場合に各対象を見ていると判定した。判定領域は、ロボットについては幅30×高さ55×奥行15の直方体（ロボットの本体サイズを元に設定）、資料A・資料Bの判定領域はそれぞれ幅30×高さ21（資料サイズと同等のA4）の面とした。視線方向取得の時間解像度は約30Hzであった。参照の判別性については、著者らの先行研究[11]で用いた視線の判別性に関するアンケートを元に、指差しの判別性に関する項目を加えた7項目を用いた。

また、遠隔コミュニケーションシステムとしての効果を評価するため、Social presence [23]に関する評価アンケートを実施した。評価アンケートはHarmsらが設計したSocial Presenceに関するアンケートのうち、本研究のタスクに関係するCo-presence (CoP), Attentional Allocation (AA), およびPerceived Message Understanding (PMU)のカテゴリの質問項目を用いた。各カテゴリの質問は6項目であり、それらの平均値をそのカテゴリのスコアとして用いる。また、各カテゴリのスコアの平均をOverallのスコアとして用いた。

全条件終了後には半構造化インタビューを行った。インタビューでは、「今回の実験のように、遠隔対話者から実空間内に配置された資料の説明を受ける状況で、どの条件のシステムを使用するのが好ましいと感じたか」という観点で、実施した4条件について1-4位の順位を回答させるとともに、その判断理由の説明を求めた。

さらに、各評価項目の分析を進める中で、AR提示の品質に対する実験参加者の主観的評価を把握する必要があると考えた。そのため事後調査として、AR提示箇所の品質（解像度、輝度、動作の滑らかさ）に関するアンケートを実施した。アンケートでは、解像度、輝度、動作の滑らかさという3つの項目について、7段階のリッカート尺度で評価を行った（1: 物理的実体としてAR提示の方が品質が低く感じた、4: 差は感じなかった、7: 物理的実体としてAR提示の方が品質が高く感じた）。

4.4 実験結果

分析に当たっては、頭部表現（物理・AR）および腕部表現（物理・AR）の2要因による2元配置分散分析を行った。なお、アンケート結果については、整列ランク変換（ART）[24]後に2元配置分散分析を行った。そして、主効果に有意差が見られた場合は、Tukey法を用いた多重比較を行った。また、有意水準は5%とした。

4.4.1 視線方向の分析

各試行の実施時間に対する、ロボットに視線が向いていた時間、資料に視線が向いていた時間（資料 A、資料 B の合計）、およびそれ以外の方向に視線が向いていた時間の割合を図 5 に示す。なお、4 名の実験参加者において、4 試行のうちの 1 試行で Hololens2 の視線検出機能のエラーが生じていた。エラー発生回数は計 64 試行（16 人×4 条件）のうち 4 試行で、6.25 %のエラー率であった。参加者内配置の実験計画であったことから、分析では該当する 4 名のデータを、エラーが含まれない条件も含めて全て除外し、12 名分のデータで分析を行った。なお、視線方向取得の成否によってユーザに提示する刺激が変化することはないため、視線方向の分析以外の評価項目においてはデータを除外せず 16 名のデータで分析を行っている。

視線方向の分析に当たっては、ロボットに視線が向いていた時間の割合に着目した。実時間ではなく割合を用いた理由は、各試行の最後の実験参加者への質問に対する回答内容の違いに起因して、タスク全体の所要時間にバラつきが生じていたためである。

各条件の平均は、C1 が 20.7 % ($SD = 7.28$)、C2 が 25.9 % ($SD = 9.09$)、C3 が 30.1 % ($SD = 8.10$)、C4 が 32.9 % ($SD = 9.12$) であった。2 元配置分散分析を行った結果、頭部表現の主効果が有意であった ($F(1, 10) = 17.2$, $p = 0.002 < 0.01$, $\eta_G^2 = 0.095$)。頭部表現について多重比較を行った結果、物理的に頭部を提示する方が、AR 提示に比べてロボットに視線が向いていた時間の割合が有意に低くなること示された ($p = 0.002 < 0.01$)。

なお、前述の視線検出機能のエラーによる 4 名分のデータ除外により、ラテン方格法を用いた各条件の実施順序、および使用スクリプトのランダム化が崩れ、結果に影響が生じている可能性があった。そこで、実験の実施順序（1~4 回目）およびスクリプトの種類（4 種）をそれぞれ要因とした 1 元配置分散分析を実施した。分析の結果、両要因とも有意差はみられなかったことから ($F(1, 3) = 0.49$, $p = 0.69$, $\eta_G^2 = 0.023$; $F(1, 3) = 0.74$, $p = 0.54$, $\eta_G^2 = 0.034$)、データ除外による顕著な影響は生じていなかったと考えられる。

4.4.2 参照の判別性に関するアンケート

参照の判別性に関するアンケートの結果を図 6 に示す。各項目について、2 元配置分散分析を行った結果、Q3、Q5、Q6、および Q7 について頭部表現の主効果が有意であった ($F(1, 15) = 6.51$, $p = 0.022 < 0.05$, $\eta_G^2 = 0.068$; $F(1, 15) = 17.6$, $p < 0.001$, $\eta_G^2 = 0.25$; $F(1, 15) = 17.2$, $p < 0.001$, $\eta_G^2 = 0.26$; $F(1, 15) = 47.4$, $p < 0.001$, $\eta_G^2 = 0.17$)。また、Q2 および Q4 について腕部表現の主効果が有意であった ($F(1, 15) = 17.5$, $p < 0.001$, $\eta_G^2 = 0.14$; $F(1, 15) = 8.07$, $p = 0.012 < 0.05$, $\eta_G^2 = 0.092$)。さらに、Q1 について頭部表現と腕部表現の交互作用が有意であった ($F(1, 15) = 5.82$, $p = 0.029 < 0.05$, $\eta_G^2 = 0.013$)。

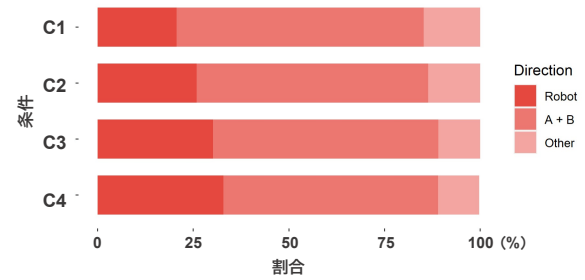


図 5 タスク中に視線が向いていた時間の割合

Fig. 5 Percentage of gained gaze duration during the task.

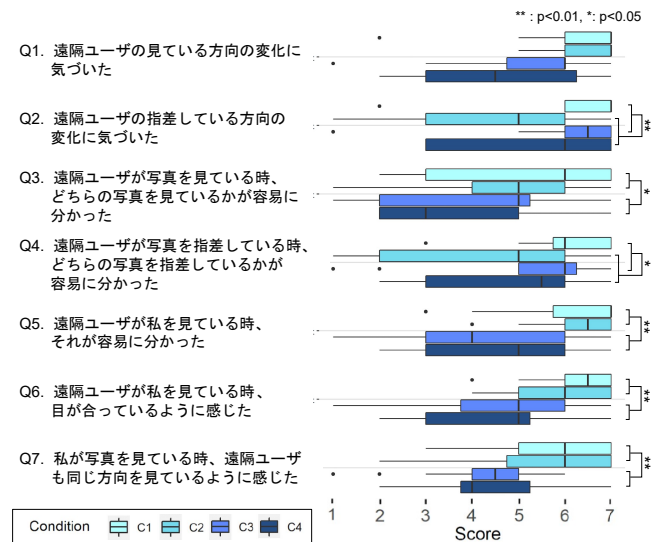


図 6 参照の判別性に関するアンケート結果

Fig. 6 Result of the questionnaire about reference.

まず、頭部表現の主効果が有意であった項目について多重比較を行った。Q3、Q5、Q6、および Q7 について、物理的に頭部を提示する方が、AR 提示に比べて評価が有意に高くなること示された ($p = 0.022 < 0.05$; $p < 0.001$; $p < 0.001$; $p < 0.001$)。次に、腕部表現の主効果が有意であった項目について多重比較を行った。Q2 および Q4 について、物理的に腕部を提示する方が、AR 提示に比べて評価が有意に高くなること示された ($p < 0.001$; $p = 0.012 < 0.05$)。最後に、頭部表現と腕部表現の交互作用が有意であった Q1 について多重比較を行ったが、それぞれの条件間で有意差は得られなかった。

4.4.3 社会的存在感に関するアンケート

社会的存在感に関するアンケートの結果を図 7 に示す。各項目について、2 元配置分散分析を行った結果、CoP(Co-presence)、PMU(Perceived Message Understanding)、および Overall について、頭部表現の主効果に有意差が見られた ($F(1, 15) = 14.0$, $p = 0.002 < 0.01$, $\eta_G^2 = 0.16$; $F(1, 15) = 10.8$, $p = 0.005 < 0.01$, $\eta_G^2 = 0.077$; $F(1, 15) = 6.61$, $p = 0.021 < 0.05$, $\eta_G^2 = 0.091$)。また、AA(Attentional Allocation) について、腕部表現の主効果に有意差が見られた ($F(1, 15) = 5.71$, $p = 0.031 < 0.05$, $\eta_G^2 = 0.031$)。

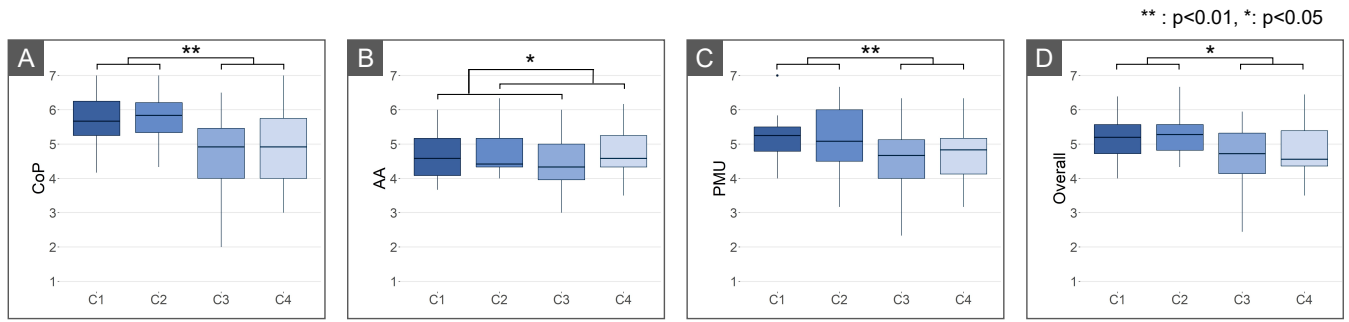


図 7 社会的存在感のアンケート結果. (A) Co-presence, (B) Attentional Allocation (C) Perceived Message Understanding (D) Overall
Fig. 7 Result of the questionnaire about social presence. (A) Co-presence, (B) Attentional Allocation, (C) Perceived Message Understanding, (D) Overall.

$\eta_G^2 = 0.017$). まず、頭部表現の主効果に有意差が見られた項目について多重比較を行った。CoP, PMU, および Overall について、物理的に頭部を提示する方が、AR 提示に比べてスコアが有意に高くなることが示された ($p = 0.002 < 0.01$; $p = 0.005 < 0.01$; $p = 0.021 < 0.05$)。次に、腕部表現の主効果に有意差が見られた項目について多重比較を行った。AA について、腕部を AR 提示する方が、物理的な提示に比べて有意にスコアが高くなることが示された ($p = 0.031 < 0.05$)。

4.4.4 インタビュー結果

インタビューにて取得した 4 条件の好ましさの順位の回答結果を図 8 に示す。もっとも好まれたのは C1: 両方物理条件であり、16 名の参加者中の 11 名が 1 位、4 名が 2 位とポジティブに評価した。一方で、C4: 両方 AR 条件は最も好まれず、16 名の参加者中の 12 名が 4 位、2 名が 3 位とネガティブに評価した。C2: 頭物理 - 腕 AR 条件と、C3: 頭 AR - 腕物理条件では評価が分かれた。C2 では 16 名の参加者中の 2 名が 1 位、4 名が 2 位と評価したのに対し、C3 では 16 名の参加者中の 2 名が 1 位、7 名が 2 位と評価した。各条件の順位について、ボンフェローニ補正のもと各条件の組み合わせでウィルコクソンの符号順位検定を行ったところ、C1 - C4 条件間および C3 - C4 条件間で有意差が見られた ($p = 0.026 < 0.05$; $p = 0.027 < 0.05$)。

4.4.5 AR 提示の品質に対する主観的評価

事後調査として実施した AR 提示の品質に対する主観的評価において、解像度の評価は平均 2.81 ($SD = 0.81$)、輝度の評価は平均 3.38 ($SD = 1.49$)、動作の滑らかさの評価は平均 4.31 ($SD = 1.26$) であった。すなわち、解像度・輝度については AR 提示の評価が物理的実体よりも低く、本研究の前提として 1 章で述べた光学シースルー式 HMD の課題が生じていることが確認された。一方で、動作の滑らかさについては AR 提示の評価が物理的実体よりもわずかに高いという結果であった。

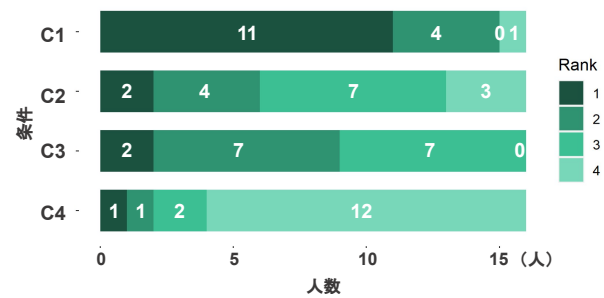


図 8 各条件の好ましさの順位の回答結果
Fig. 8 Result of ranking of preference for each condition.

5. 考察

4.4 節の結果より、頭部・腕部の提示方法の違いによる影響について考察する。

5.1 頭部の提示方法の違いによる影響

頭部の提示方法の違いによる影響として、参照の判別性に関するアンケートの Q3 (資料に対する視線の判別性)、Q5 (参加者に対する視線の判別性)、Q6 (目が合う感覚)、および Q7 (同じ資料を見ている感覚) において、頭部を物理的に提示することで AR 提示する場合よりも有意に評価が高くなった。これらは、人間同士の対話における注視の重要な役割である相互注視と共同注意に関する評価が向上したといえることができる (相互注視: Q5, Q6, 共同注意: Q3, Q7)。この結果に関連して、インタビューでは P16 「頭が物理だと目が合ってる感じがする」、P1 「頭が物理のほうが見てるところを理解できたから会話が入ってきやすかった」等の意見が得られた。その理由としては、視野角の制約に言及した意見が 11 件 (P4 「MR は顔を動かしたときに視野角から外れて見えにくい」等)、CG 提示の画質に言及した意見が 2 件 (P9 「MR だと腕の形や顔の形が見えにくく、どちらを向いているかが分からなかった」等) であったことから、視野角の制約がより顕著に影響していたと考えられる。

また、社会的存在感の評価では、CoP(Co-Presence)とPMU(Percieved Message Understanding)、および総合スコアにおいて、頭部を物理的に提示することでAR提示する場合よりも有意に評価が高くなった。一方で、頭部を物理的に提示することでタスク中にロボットを見ていた時間の割合が有意に減少することが示された。

これらの結果をまとめると、頭部を物理的に提示することで、ARで提示する場合と比較して、参照の判別性（特に相互注視と共同注意）と社会的存在感が向上することが示された。頭部を物理的に提示した場合に、タスク中にロボットを見ていた時間の割合が有意に低下していることについては、物理的な頭部であれば周辺視野で情報を取得できることからあえてロボットを見る時間が減少したと考えられる。この結果に関連して、インタビューではP1「視野角が狭くて頭が見切れるのでロボットがどこ見ているかわからず、そちらに注意がいった会話が入ってきづかった」という意見が得られた。

5.2 腕部の提示方法の違いによる影響

腕部の提示方法の違いによる影響として、参照の判別性に関するアンケートのQ2（指差し方向の変化に対する判別性）、Q4（資料に対する指差しの判別性）において、腕部を物理的に提示することでAR提示する場合よりも有意に評価が高くなった。この結果に関連して、インタビューではP4「方向を示す際に実物体の腕の方が指している方向が分かりやすい」という意見が得られた。また、社会的存在感の評価では、AA(Attentional Allocation)において、腕部を物理的に提示することで、AR提示する場合よりも評価が有意に低くなった。この結果に関連して、インタビューではP7「腕があることによってロボットの方に注目がいき、絵の方をあまり見れなかった」という意見が得られた。

これらの結果より、腕部を物理的に提示することで、ARで提示する場合と比較して、資料に対する指差しを用いた参照の判別性が向上することが示された。一方で、AAは注意の配分に関する評価項目であり、腕を物理的に提示することで評価が低下することが示された。よって、腕部の物理的な提示は参照の判別性を向上させる反面、注意を阻害する等の懸念があると考えられる。

5.3 各条件の好ましさの順位に関する考察

もっとも好まれたのはC1: 両方物理条件、その次はC3: 頭AR-腕物理条件、C2: 頭物理-腕AR条件の順でならば、もっとも好まれなかったのはC4: 両方AR条件であった。ただし、C2: 頭物理-腕AR条件と、C3: 頭AR-腕物理条件では評価が分かれた。これに関連して、各条件の順位を決める際には実験参加者がタスクにおいて何を重視したかが反映されていた可能性が示唆された。すなわち、

資料から情報を取得することを重視するのか、もしくは遠隔参加者との対話を重視するのが参加者によって異なり(P2「身振りが分かりやすい方が説明する時にわかりやすく良かった(C3 > C2)」。P1「ロボットとコミュニケーションをとるうえで腕は重視していなかった。腕は一瞬向きが分かれば良い(C2 > C3)」等)、その違いが順位に反映されていた可能性がある。

5.4 ハイブリッド型ロボットの設計指針

実験結果より、総合的には両方物理条件が最も効果的である一方で、参照の判別性（特に相互注視と共同注意）と社会的存在感は、ハイブリッド型ロボットであるC2: 頭物理-腕AR条件でも同等の評価を得られることが示され、頭部を物理的に提示することの効果が示された。また、資料に対する指差しを用いた参照の判別性については腕部を物理的に提示することの効果が示された。よって、目的に応じて身体部位の提示方法を選定することで、物理的なロボットの設計・実装・メンテナンスのコストを軽減しながら、有効性を維持するハイブリッド型ロボットが実現可能となる。

具体的な設計指針としては、参照の判別性（特に相互注視と共同注意）と社会的存在感の伝達を重視する場合には、頭部を物理的に提示するハイブリッド型ロボットが有効となる。想定される状況としては、revise学会等におけるポスター発表や資料を用いたビジネスの打ち合わせ等の様に、資料に対する参照だけでなく、参加者間での議論や信頼関係の構築が必要となるシチュエーションがこれに該当する。

腕部を物理的に提示するハイブリッド型ロボットについては、資料に対する指差しを用いた参照の評価が高く、社会的存在感が低いという特徴をもつ。このような特徴が適した状況は限定的であるが、例えば美術館等において極力ロボットの存在感を抑え、説明対象への集中を維持しながら説明を行うことが望ましい状況での使用が考えられる。ただし、腕部を物理的に提示することで、AA(Attentional Allocation)の評価が下がることも示されていることから、腕部の外観や動作音などに配慮し注意阻害を抑制する設計が必要になる。

最後に、上記の2種類のハイブリッド型ロボットを、有効性、およびコストパフォーマンスの観点で評価する場合、総合的には頭部を物理的に提示するハイブリッド型ロボットの方が効果的な構成であると考えられる。これは、指差しの判別性以外では両方物理条件との差が無いこと、さらに今回用いたロボットでは頭部2自由度に対して腕部は8自由度であり設計や実装のコストにも大きな差が生じていることによる。

5.5 本研究の制約と将来の展望

5.5.1 実験条件の制約

4.2節で述べたように、今回の実験ではいずれの条件においてもロボットの胴体部分（ディスプレイおよび土台）が物理的に提示されており、VROOM[14]のようなARを中心とした表示との比較は行っていない。ただし、5.1節～5.2節の考察を元に考えれば、C4: 両方AR条件からさらに物理的な提示領域が減ることから、参照の判別性や社会的存在感がさらに低下することが予想される。

また、今回の実験で設定した条件では、ロボットの胴体部のディスプレイにビデオ通話（遠隔参加者の顔映像）は提示していない。これは、頭部と腕部の提示方法の違いによる影響に焦点を当て評価を行うことを目的とした設定であった。ただし、ディスプレイに表示したビデオ通話と、物理的な身体部位（腕部、頭部）を併用するテレプレゼンスロボットも提案されており[11], [12], そのような構成ではロボットの身体部位とビデオ映像の双方に注意を向けることになる。よって、本研究で用いた条件にビデオ通話を追加した場合の影響も評価を行う必要がある。

5.5.2 実験設定の制約

説明内容が事前に設定したスクリプトの再生であったため、社会的存在感の評価で得られた知見は限定的であると考えられる。今回の実験では、各身体部位の提示方法の違いによる影響を、発話内容と動作を統制し定量的に評価することを目的として、事前に設定したスクリプトを採用した。このような設定により、「システム側から提示される発話および動作」が社会的存在感に与える影響については適切に評価を行うことができたと考えられる。一方で、実際の人間同士の会話は、一方的に発言や動作を提示するだけでなく、相手の発話や動作に対して相互に応答繰り返すことでインタラクティブに進行される。そのため、今後は実際にシステムを用いてリアルタイムに会話を行う状況で、社会的存在感の評価を行う必要がある。合わせて、今回はロボットと接する現地側のユーザだけが評価対象であり、遠隔参加者視点でのハイブリッド型ロボットの影響について評価を行っていないため、今後リアルタイムに会話を行う状況で実験を実施する上では、遠隔参加者についても評価対象とし分析を行う必要がある。さらに、参加者が一対一で資料を含めた会話を行う状況だけでなく、現地側に複数の参加者が存在する状況においても評価を行う必要がある。

また、今回の実験では、実験参加者の年齢や性別が限定的であり、さらに全ての参加者が情報系の学部・専攻に所属していた。よって、今後は上記の参加者要因以外のより多様な実験参加者を対象として評価を行う必要がある。

加えて、各条件の好ましさの順位に関する考察の結果からは、同じタスクでも実験参加者がどのようなシステム構成を好むか（特にC2, C3のどちらを好むか）にバラつきがあるという結果、そしてその結果がタスクにおいて実験

参加者が何を重視したか（対象物の説明 or 遠隔対話者との会話）の影響を受けている可能性が示唆された。よって、本研究とは異なる実験設定と、より多様な参加者要因での分析を通して、参加者がどのようなシステム構成を好むかについてより詳細な分析を行う必要がある。

5.5.3 AR提示デバイスの制約

今回の実験ではAR提示デバイスとして光学シースルー式のHololens 2を用いたが、他のAR提示手法を用いた場合には異なる結果となる可能性がある。例えばApple社のVision Proのようなビデオシースルー式のAR提示方法では、輝度や解像度の観点で物理的な提示とAR提示の差が少なくなることが考えられる。また、他にもタブレット端末のカメラを用いたディスプレイ越しのAR提示方法や、空中映像ディスプレイを用いる手法も存在する。よって、異なるAR提示手法を用いる場合のハイブリッド型ロボットの効果については別途検討を行う必要がある。

5.5.4 発展的なAR提示内容の検討

本研究では、各身体部位の提示方法の違いによる影響を評価することを目的として、AR提示する情報をロボットの頭部と腕部の3Dデータに限定した。一方で、AR提示デバイスを用いるのであれば、ロボットとして実装するための物理的な制約に縛られず、外観や関節数を人間に近づけたり、さらには人間の身体形状にもとらわれない表現も可能となる（腕を伸縮させて指差しを行う等）。さらには、ロボットや周囲の環境に何らかのARオブジェクトを配置したり、テキスト情報や画像、動画などを用いる表現も可能となる。今後は、そのような発展的なAR提示を用いる場合に、どのような内容を提示するべきか、またロボットの物理的な身体をどう組み合わせるべきかの検討を行っていく。

6. おわりに

本研究では、実空間への空間的な参照を伝達する遠隔コミュニケーションシステムを実現するための手段として、ハイブリッド型ロボットに着目した。そしてその設計指針を得るため、頭部と腕部について物理的な提示とAR提示を切替えられるロボットを実装し、各身体部位の物理的な提示とAR提示を組み合わせた4条件で比較実験を実施した。実験結果より、頭部の物理的な提示が空間的参照と社会的存在感の伝達に重要であることが示された。また得られた知見をもとに、空間的参照と社会的存在感の伝達に適したハイブリッド型ロボットの設計指針を提案した。

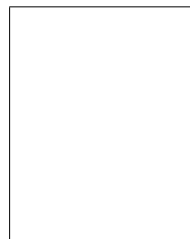
なお、本研究においては、実験条件や実験設定の制約や、使用したAR提示デバイスが光学シースルー式のみであったこと等の制約があったため、今後更なる調査を行う必要がある。また、今回の研究ではAR提示する情報をロボットの頭部と腕部の3Dデータに限定したが、ARを用いる

ことで物理的な制約にとらわれない表現が可能になることから、今後はそのような発展的な表現についても検討を行っていく。

謝辞 本研究は立石科学技術振興財団の研究助成 (A) による補助を受け実施した。

参考文献

- [1] Marjorie Fink Vargas. *Louder than words: An introduction to nonverbal communication*. Iowa State Press, 1986.
- [2] Christian Heath and Paul Luff. Disembodied conduct: Communication through video in a multi-media office environment. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pp. 99–103, 1991.
- [3] Amy Volda, Nathan Bos, Judith Olson, Gary Olson, and Lauren Dunning. Cross-cutting faultlines of location and shared identity in the intergroup cooperation of partially distributed groups. In *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems*, pp. 3101–3110, 2012.
- [4] Susan R Fussell, Leslie D Setlock, Jie Yang, Jiazhi Ou, Elizabeth Mauer, and Adam DI Kramer. Gestures over video streams to support remote collaboration on physical tasks. *Human-Computer Interaction*, Vol. 19, No. 3, pp. 273–309, 2004.
- [5] 田中一晶, 中西英之, 石黒浩. ロボット会議: 物理的実体を介した身体動作の提示によるソーシャルテレプレゼンスの強化. 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 1, pp. 209–217, 2016.
- [6] Xandex Inc. Kubi telepresence robot.
- [7] David Sirkin and Wendy Ju. Consistency in physical and on-screen action improves perceptions of telepresence robots. In *Proceedings of the seventh annual ACM/IEEE international conference on Human-Robot Interaction*, pp. 57–64, 2012.
- [8] Jacob T Biehl, Daniel Avrahami, and Anthony Dunnigan. Not really there: Understanding embodied communication affordances in team perception and participation. In *Proceedings of the 18th ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work & Social Computing*, pp. 1567–1575, 2015.
- [9] Yuya Onishi, Kazuaki Tanaka, and Hideyuki Nakanishi. Poparm: A robot arm for embodying video-mediated pointing behaviors. In *2014 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, pp. 137–141. IEEE, 2014.
- [10] Hideaki Kuzuoka, Jun'ichi Kosaka, Keiichi Yamazaki, Yasuko Suga, Akiko Yamazaki, Paul Luff, and Christian Heath. Mediating dual ecologies. In *Proceedings of the 2004 ACM conference on Computer supported cooperative work*, pp. 477–486, 2004.
- [11] 川口一画, 森田智紀, 葛岡英明, 鈴木雄介. ヒューマノイド型頭部を付与したテレプレゼンスロボットの注視提示が遠隔コミュニケーションに与える効果. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 20, No. 4, pp. 457–468, 2018.
- [12] Sigurdur Orn Adalgeirsson and Cynthia Breazeal. Mebot: A robotic platform for socially embodied telepresence. In *2010 5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 15–22. IEEE, 2010.
- [13] Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Sho Kamuro, Kouta Minamizawa, Susumu Tachi, et al. Design of telesar v for transferring bodily consciousness in telepresence. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5112–5118. IEEE, 2012.
- [14] Brennan Jones, Yaying Zhang, Priscilla NY Wong, and Sean Rintel. Belonging there: Vroom-ing into the uncanny valley of xr telepresence. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, Vol. 5, No. CSCW1, pp. 1–31, 2021.
- [15] Le Luo, Dongdong Weng, Jie Hao, Ziqi Tu, and Haiyan Jiang. Controllable telepresence: A robotic-arm-based mixed-reality telecollaboration system. *Sensors*, Vol. 23, No. 8, p. 4113, 2023.
- [16] Thomas Groechel, Zhonghao Shi, Roxanna Pakkar, and Maja J Matarić. Using socially expressive mixed reality arms for enhancing low-expressivity robots. In *2019 28th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp. 1–8. IEEE, 2019.
- [17] 井上康之, 加藤史洋, 館ほか. テレイグジスタンスロボットにおける身体表現機能のvr拡張. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 137–140, 2019.
- [18] Adam Kendon. *Conducting interaction: Patterns of behavior in focused encounters*, Vol. 7. CUP Archive, 1990.
- [19] Gerhard Sigurd Nielsen. *Studies in Self Confrontation: Viewing a Sound Motion Picture of Self and Another Person in a Stressful Dyadic Interaction*. Munksgaard., 1964.
- [20] Chris Moore, Philip J Dunham, and Phil Dunham. *Joint attention: Its origins and role in development*. Psychology Press, 2014.
- [21] 大西裕也, 田中一晶, 中西英之ほか. 身体映像の部分的実体化によるソーシャルテレプレゼンスの強化. 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 1, pp. 228–235, 2016.
- [22] Ikkaku Kawaguchi, Ayumi Ichikawa, Keiichi Ihara, Ryo Ishibashi, and Aoto Tanokashira. Hybrid robot with physical and ar body presentation. 2022.
- [23] Chad Harms and Frank Biocca. Internal consistency and reliability of the networked minds measure of social presence. In *Seventh annual international workshop: Presence*, Vol. 2004. Universidad Politecnica de Valencia Valencia, Spain, 2004.
- [24] Jacob O Wobbrock, Leah Findlater, Darren Gergle, and James J Higgins. The aligned rank transform for non-parametric factorial analyses using only anova procedures. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pp. 143–146, 2011.



川口 一画 (正会員)

2017 年筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻博士後期課程修了。博士 (工学), 修士 (感性科学)。現在, 筑波大学システム情報系助教。CSCW, HRI の研究に従事。情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会, 感性工学会, ACM 会員。



井原 圭一

2022 年筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒業。現在、同大学大学院博士前期課程情報理工学位プログラム在学中。AR,CSCW の研究に従事。



市川 あゆみ (学生会員)

2023 年筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒業。現在、同大学大学院博士前期課程情報理工学位プログラム在学中。VR,CSCW の研究に従事。情報処理学会, ACM 学生会員。



佐方 葵

2023 年熊本高等専門学校電子情報システム工学専攻修了。現在、筑波大学大学院博士前期課程情報理工学位プログラム在学中。AR,CSCW に関する研究に従事。



守 新太郎 (学生会員)

2022 年神戸市立工業高等専門学校電子工学科卒業。現在、筑波大学情報学群情報メディア創成学類在学中。AR,CSCW の研究に従事。情報処理学会学生会員。