

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拡張非言語表現の提案

芦沢 優介^{†,1,a)} 守 新太郎^{†,1,b)} 長谷川 実紀² 藤川 興昌³ 市川 あゆみ¹ 佐方 葵¹ 井原 圭一¹
川口 一画⁴

概要：ビデオ通話における非言語情報伝達の課題に対して、物理的なロボットや Augmented Reality (AR) 技術を用いた非言語情報伝達手法が提案されている。しかし、物理的なロボットを用いる手法では物理的な実装にコストがかかる課題、AR を用いる手法では AR デバイスの画角の制限により周辺視野で情報が欠落する課題が生じる。そこで本研究では、ロボットの物理的な身体部位と光学シースルー AR デバイスを用いた AR 提示を併用するハイブリッド型ロボットに着目する。そしてハイブリッド型ロボットにおいて、物理的な制約にとらわれずロボットの非言語表現を拡張する手法を拡張非言語表現と定義し、その設計指針を確立することを目的とする。本論文では、遠隔コミュニケーションにおけるロボットの利用目的に即して、ハイブリッド型ロボットの構成・表現内容をデザインスペースとして整理するとともに、その一部を実装したプロトタイプシステムについて説明を行う。

1. はじめに

COVID-19 のパンデミックにより video 会議は急速に一般化した。ビデオ通話は対面のインタラクションを完全に代替するものではなく、課題が生じる。その課題の一つが非言語情報の伝達である。非言語情報は対面でのインタラクションにおいて重要な役割を果たす。たとえば、各参加者の視線は会話の進行や話者交代に関係し、会話の進行において重要な役割を果たす [1], [2], [3]。また、何らかの対象物を含むインタラクションでは、指差し等により参照を示し、参加者間で共通理解を構築することも重要である [4]。しかし、平面的なビデオでは、空間的な方向の誤認が生じることにより、これらの非言語情報が適切に伝達されない [5], [6]。また、ディスプレイ越しに相手を見ることが対面の場合よりもアウェアネスが低下し非言語情報が気づかれにくくなる [7]。

このような非言語情報伝達の課題に対して、物理的なロボットを用いる手法 (Robotic embodiment) は一つの解決方法である [8]。たとえばディスプレイの回転や移動により遠隔ユーザの視線や身体配置を伝達する手法が提案さ

れている [9], [10]。さらに、頭部や腕部等の人間に近い身体部位を有するロボットでは、ロボットの物理的な身体部位を用いて、より高度な非言語情報の伝達が可能である [11], [12], [13]。ただし、目的とする非言語情報の伝達に必要な身体部位を物理的に実装する必要があり、システムの設計や実装、メンテナンスにコストがかかる。

別のアプローチとして、Hololens 等の Augmented Reality (AR) デバイスを用いて CG アバタにより非言語情報を提示する手法 (Virtual embodiment) も提案されている [14], [15], [16]。CG による非言語情報提示はロボットのように物理的な制約を受けないため、高度な表現を比較的低コストで実現可能である。さらに、物理的な制約にとらわれない拡張的な表現 (手を伸ばす [17], 視線方向を矢印や泡で示す [18] 等) も可能となる。一方で、現在普及している AR ヘッドセットは視野角に制限があり [19], 周辺視野で情報が欠落するという課題が生じる。

本研究では、このような Robotic embodiment と Virtual embodiment のトレードオフに対して、周辺視野を遮蔽しない光学シースルー式の AR デバイスと、物理的な実体を有するロボットを併用する構成に着目する。本研究では、非言語情報伝達のために物理的なロボットと AR 提示を併用する構成を Hybrid embodiment と定義し、そのような構成を採用したハイブリッド型ロボットを提案する (図 1)。ハイブリッド型ロボットでは、AR デバイスの視野角内では、AR を用いて物理的なロボットの表現を拡張すること

¹ 筑波大学 情報理工学位プログラム

² 筑波大学 情報科学類

³ 筑波大学 情報メディア創成学類

⁴ 筑波大学 システム情報系

[†] Authors contributed equally.

^{a)} ashizawa@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

^{b)} smori@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

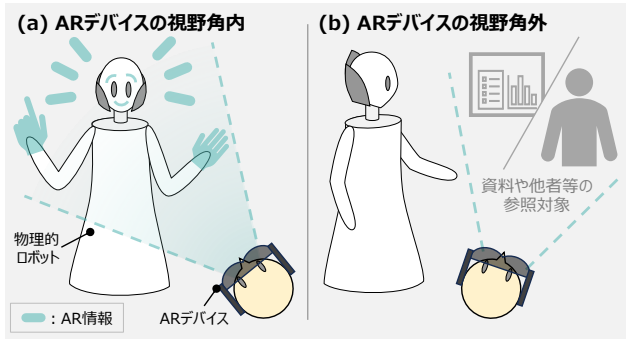


図 1 ハイブリッド型ロボットのコンセプト。(a)AR デバイスの視野角内では AR により物理的なロボットの表現が拡張される,(b)AR デバイスの視野角外では物理的なロボットが常時提示され周辺視野での情報欠落を補う

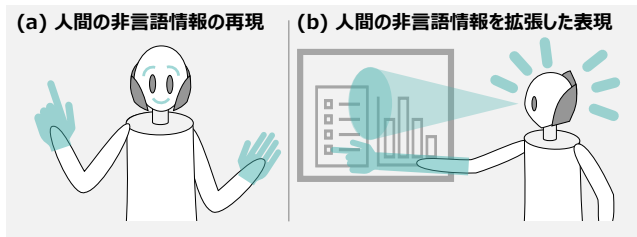


図 2 ハイブリッド型ロボットにおける拡張非言語表現の方向性。(a)AR により物理的なロボットを補い人間の非言語情報を再現する,(b)AR により人間の非言語情報を拡張した表現を行う。

ができる (図 1-a)。また AR デバイスの視野角外では、物理的な身体部位が常時表示され続けることから、周辺視野での情報欠落を補うことができる (図 1-b)。なお、ロボットの表現拡張の方向性としては、物理的に実装するのが困難、もしくはコストがかかる人間の非言語情報 (表情、手指等) を AR を用いて補う方向性 (図 2-a) と、物理的な制約にとらわれず人間の非言語情報を拡張する方向性 (指差し時に腕を伸ばす、視線をレイで可視化する、感情を何らかのエフェクトで可視化する等) を提案する (図 2-b)。

本論文では、関連研究として Robotic embodiment, Virtual embodiment, Hybrid embodiment に関する関連研究について説明した後、ハイブリッド型ロボットのデザインスペースを検討し、利用目的に即して考え得る構成・表現内容を整理する。そして、デザインスペースで示した内容の一部を実装したプロトタイプシステムについて説明を行い、最後に今後の方針を述べる。

2. 関連研究

2.1 Robotic Embodiment

ロボットを用いた非言語情報伝達手法として、Kubi に代表されるテレプレゼンスロボットは、カメラが搭載されたディスプレイを回転させることにより、遠隔参加者は現地側の特定の方向を見ることができ、現地側の参加者に参照が伝達される。このようなディスプレイを回転させる方法はビデオ映像と組み合わせることが可能であり、多くの

システムで採用されている [9], [10], [20], [21], [22]。参照の伝達は遠隔参加者の存在感の向上や会話の円滑化に寄与することが示される一方 [9], [10], 顔画像が写されたディスプレイを回転させる場合視線の誤認が生じることも報告されている [5], [6]。別のアプローチとして、頭部や腕など、より人間に近い身体部位を用いたシステムが提案されている [11], [12], [23]。しかし、物理的な身体部位を用いる場合、システムの設計や実装、およびメンテナンスにコストがかかる。本研究では、このようなコストを削減できる可能性を有するハイブリッド型ロボットの可能性を探る。

2.2 Virtual Embodiment

AR を用いた非言語情報伝達手法として、身体の一部 (頭部、手) を表現したシンプルな形状を提示する手法 [24] や、人間の全身を再現した CG アバタを用いる手法 [16] が提案されている。また、事前に用意された CG アバタではなく、デプスカメラにより取得されたポイントクラウドを用いて実際のユーザの外観を伝達する手法も提案されている [14], [15]。これらの手法で用いられる HMD は、視野角に制約があり Human Vision を完全にカバーすることは困難である [19]。そのため、FOV 内にアバタを収めるため小人として表現する手法など、視野角の課題に対応するための提案が行われている [25], [26]。また、実空間中のオブジェクトとした場合、輝度や解像度も制約がある。本研究では、物理的な実体を持つロボットを AR と併用することにより、これらの AR の制約による影響を緩和することを目指す。

なお、上記のうち一部のシステム [15], [16] は物理的なロボットと AR を併用している。ただし、これらのシステムでは、embodiment は AR で完結していることから、embodiment のために物理的身体と AR を併用する hybrid embodiment とは区別することとする。

2.3 Hybrid Embodiment

Hybrid embodiment に関する関連研究として、groechel らは腕を持たない Social Robot に腕を付与し表現力を向上させる手法を提案した [27]。Han らはモバイルプラットフォームに腕が付与されたロボットにおいて、物理の腕と AR の腕による deictic gesture の効果を比較する研究を行った [28]。また、著者らは先行研究において、頭部・腕部を物理もしくは AR に切り替え可能なロボットを実装し、各身体部位の提示モダリティの違いが社会的存在感および参照に与える影響を調査する研究を行った [29]。これらの研究はいずれもハイブリッド型ロボットの有効性を調査した研究であった一方で、AR 提示された情報が限定的であり、図 2(b) で示したような拡張表現の検討も行われていなかった。そこで本研究では、ハイブリッド型ロボットのデザインスペースを検討し、利用目的に即して考え得る構

成・表現内容を整理するとともに、その一部を実装したプロトタイプシステムについて説明を行う。

3. 提案システム

3.1 デザインスペース

本研究で提案するハイブリッドロボットのデザインスペースを図3に示す。図の縦軸方向には、ロボットの非言語情報提示が重要となる観点として、実空間内で人やモノとインタラクションする際に重要となる「参照」、社会的存在感や感情の伝達に重要な「外観・表情」、そして「その他」を設定した。図の横軸方向には、ARによる情報提示の方向性として、「情報の付与」、「情報の精細化」、「拡張表現」を設定した。このうち「情報の付与」は、物理的には存在しない情報をARで付与することを目的とし、例えば身体部位を持たないディスプレイ等に対して参照の伝達のための頭部や腕部を付与したり（図3-i）、シンプルな形状のロボットの外見・表情を拡張するために顔の特定の部位（口、眉等）や手指を付与する（図3-ii）ことを想定する。「情報の精細化」は、提示する情報を精細化し人間に近づけることを目的とし、人間の外観をポイントクラウドを用いたホログラムや事前に作成したリアルなアバタとして重畳することを想定する（図3-iii）。「拡張表現」は、物理的な制約にとらわれないARならではの表現を付与することを目的とし、例えば参照の伝達のために視線や指差し方向にレイを飛ばしたり腕を伸ばす表現や（図3-iv）、感情を伝達するためのエフェクト（感情に応じて色が変化する光等）を提示する表現（図3-v）、さらに会話内容をテキスト情報として提示したり会話に関連する画像を提示する機能（図3-vi）などを想定する。デザインスペースで提示した内容を網羅的に提示可能なシステムの実現を目指し、本研究ではプロトタイプの実装を行った。

3.2 プロトタイプシステム

本研究では、著者らの先行研究 [29] にて実装した遠隔コ

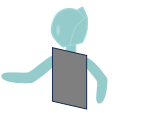
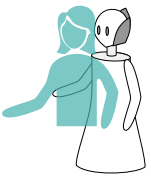
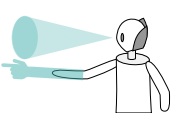
	情報の付与	情報の精細化	拡張表現
参照	i. 腕・頭部等の付与 	iii. ポイントクラウドを用いたホログラムまたは本人を再現したリアルなアバタの付与 	iv. レイ、腕を伸ばす等 
外見・表情	ii. 表情・手指等の付与 		v. 感情を示すエフェクト 
その他			vi. テキスト/画像情報 

図3 拡張表現のデザインスペース

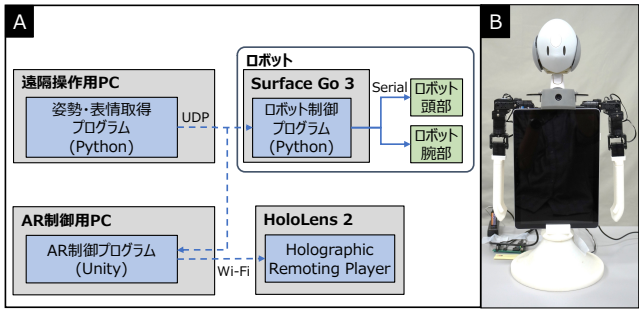


図4 システム構成。(A) システムのブロック図、(B) ロボットの外観。

ミュニケーション支援を目的としたシステムを拡張する形でプロトタイプシステムの実装を行った。プロトタイプシステムの構成を図4に示す。

本研究で実装したシステムは、ロボット、Hololens 2、AR制御用PC、および遠隔操作作用PCから構成される。ロボットの外観を図4-B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、およびpanの1自由度を有する土台部分から構成され、頭部および腕部はそれぞれ着脱可能である。それぞれの関節はサーボモータにより動作し、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。各関節の角度は、遠隔操作作用PCからUDP通信により受信した情報が反映される。遠隔操作作用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上で実行される。またロボットを操作する際は、Surface Go 3上でビデオ通話アプリケーション（Microsoft Teams等）を起動し音声通話を行う。

Hololens 2はロボットにAR情報を重畳提示するために用いる。提示されるAR情報は、AR制御用PC上で実行されるAR制御プログラムにより制御され、Microsoft社が提供するHolographic Remoting Playerを用いてHololens 2上で再生される。

遠隔操作作用PC上では、ロボットを遠隔操作するための姿勢取得プログラムおよび表情取得プログラムが実行され、取得された制御情報はUDP通信によりロボットおよびAR制御用PCに送信される。姿勢取得プログラムは、Media Pipeを用いて取得した上半身の姿勢情報を元にFinal IKを用いて腕部の角度情報を取得する。頭部姿勢・表情取得プログラムは、Dlibを用いて頭部方向および顔の特徴点情報を取得する。

AR制御用PC上では、UDP通信で受信した遠隔操作作用PCからの制御情報をもとに、ロボットの身体部位のAR提示および拡張表現の描画・制御を行うAR制御プログラムが実行される。現時点では、ロボットへの腕・頭部の付与、表情・手指の付与、指差し方向へのレイの提示、感情を示すエフェクトの提示を実装した（図5）。ロボットの身

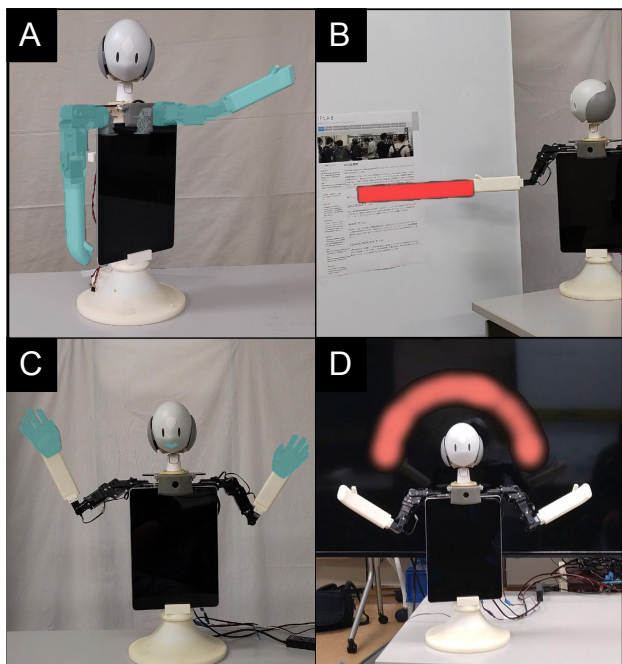


図 5 プロトタイプシステムの機能, (A) 身体部位の付与, (B) レイによる指差しの拡張, (C) 表情および手指の拡張, (D) エフェクトによる感情の可視化。

身体部位の AR 提示では、遠隔操作用 PC から受信した姿勢情報をもとに、ロボットの身体部位の CG モデルを回転させることで動作の提示を行う（図 5-A）。指差し方向へのレイの提示では、Unity の LineRenderer コンポーネントを用いてロボットの指先からレイを提示する（図 5-B）。ロボットへの表情付与では、遠隔操作用 PC から受信した姿勢情報をもとに、描写した口を模した Unity のキューブオブジェクトの曲率を変化させる（図 5-C）。感情を示すエフェクトの提示では、Unity の Particle System コンポーネントを用いて実装したエフェクトにより感情を示す光を提示する（図 5-D）。なお、将来的には遠隔操作用 PC で認識した表情から感情を識別する予定であるが、現時点ではキー操作により手動で提示する感情を変化させる。

4. 今後の方針

本論文では、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拡張非言語表現を提案し、そのデザインスペースおよび現状のプロトタイプシステムについて説明を行った。今後は、デザインスペースのうち未実装の部分として、ポイントクラウドを用いたホログラム提示機能や、対話内容に応じたテキストや画像情報の提示を行う機能の実装を進める。その後、提案する拡張非言語表現の有効性を検証するため、物理的なロボットを併用せず全ての情報を AR 提示する条件や、物理的なロボットのみを用いる条件との比較実験を実施する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 24K20808 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Adam Kendon. *Conducting interaction: Patterns of behavior in focused encounters*, Vol. 7. CUP Archive, 1990.
- [2] Gerhard Sigurd Nielsen. *Studies in Self Confrontation: Viewing a Sound Motion Picture of Self and Another Person in a Stressful Dyadic Interaction*. Munksgaard., 1964.
- [3] Henny Admoni and Brian Scassellati. Social eye gaze in human-robot interaction: a review. *Journal of Human-Robot Interaction*, Vol. 6, No. 1, pp. 25–63, 2017.
- [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] Stuart M Anstis, John W Mayhew, and Tania Morley. The perception of where a face or television portrait is looking. *The American journal of psychology*, Vol. 82, No. 4, pp. 474–489, 1969.
- [6] Ikkaku Kawaguchi, Hideaki Kuzuoka, and Yusuke Suzuki. Study on gaze direction perception of face image displayed on rotatable flat display. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1729–1737, 2015.
- [7] 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.
- [8] Eric Deng, Bilge Mutlu, Maja J Mataric, et al. Embodiment in socially interactive robots. *Foundations and Trends® in Robotics*, Vol. 7, No. 4, pp. 251–356, 2019.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Hideaki Kuzuoka, Yuya Suzuki, Jun Yamashita, and Keiichi Yamazaki. Reconfiguring spatial formation arrangement by robot body orientation. In *2010 5th ACM/IEEE international conference on human-robot interaction (HRI)*, pp. 285–292. IEEE, 2010.
- [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] 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.
- [14] Sergio Orts-Escolano, Christoph Rhemann, Sean Fanello, Wayne Chang, Adarsh Kowdle, Yury Degtyarev, David Kim, Philip L Davidson, Sameh Khamis, Ming-song Dou, et al. Holoportation: Virtual 3d teleportation in real-time. In *Proceedings of the 29th annual symposium on user interface software and technology*, pp. 741–754, 2016.

- [15] 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. In *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–12, 2023.
- [16] 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.
- [17] Ivan Poupyrev, Mark Billinghurst, Suzanne Weghorst, and Tadao Ichikawa. The go-go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in vr. In *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 79–80, 1996.
- [18] Junko Ichino, Masahiro Ide, Takehito Yoshiki, Hitomi Yokoyama, Hirotohi Asano, Hideo Miyachi, and Daisuke Okabe. How gaze visualization facilitates initiation of informal communication in 3d virtual spaces. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 31, No. 1, pp. 1–32, 2023.
- [19] Lik-Hang Lee, Tristan Braud, Simo Hosio, and Pan Hui. Towards augmented reality driven human-city interaction: Current research on mobile headsets and future challenges. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, Vol. 54, No. 8, pp. 1–38, 2021.
- [20] Naomi T Fitter, Luke Rush, Elizabeth Cha, Thomas Groechel, Maja J Matarić, and Leila Takayama. Closeness is key over long distances: Effects of interpersonal closeness on telepresence experience. In *Proceedings of the 2020 ACM/IEEE international conference on human-robot interaction*, pp. 499–507, 2020.
- [21] Andriana Boudouraki, Joel E Fischer, Stuart Reeves, and Sean Rintel. ”i can’t get round” recruiting assistance in mobile robotic telepresence. *Proceedings of the ACM on Human-computer Interaction*, Vol. 4, No. CSCW3, pp. 1–21, 2021.
- [22] Mose Sakashita, E Andy Ricci, Jatin Arora, and François Guimbretière. Remotocode: Robotic embodiment for enhancing peripheral awareness in remote collaboration tasks. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, Vol. 6, No. CSCW1, pp. 1–22, 2022.
- [23] Giulia Barbareschi, Midori Kawaguchi, Hiroaki Kato, Masato Nagahiro, Kazuaki Takeuchi, Yoshifumi Shiiba, Shunichi Kasahara, Kai Kunze, and Kouta Minamizawa. “i am both here and there” parallel control of multiple robotic avatars by disabled workers in a café. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–17, 2023.
- [24] Huidong Bai, Prasanth Sasikumar, Jing Yang, and Mark Billinghurst. A user study on mixed reality remote collaboration with eye gaze and hand gesture sharing. In *Proceedings of the 2020 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 1–13, 2020.
- [25] Thammathip Piumsomboon, Gun A Lee, Jonathon D Hart, Barrett Ens, Robert W Lindeman, Bruce H Thomas, and Mark Billinghurst. Mini-me: An adaptive avatar for mixed reality remote collaboration. In *Proceedings of the 2018 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 1–13, 2018.
- [26] Thammathip Piumsomboon, Gun A Lee, Andrew Irlitti, Barrett Ens, Bruce H Thomas, and Mark Billinghurst. On the shoulder of the giant: A multi-scale mixed reality collaboration with 360 video sharing and tangible interaction. In *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 1–17, 2019.
- [27] 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.
- [28] Zhao Han, Yifei Zhu, Albert Phan, Fernando Sandoval Garza, Amia Castro, and Tom Williams. Crossing reality: Comparing physical and virtual robot deixis. In *2023 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, 2023.
- [29] 川口一画, 井原圭一, 市川あゆみ, 佐方葵, 守新太郎. 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. *情報処理学会論文誌*, Vol. 65, No. 3, pp. 706–717, 2024.