

Augmented Avatar の提案と号機を試作検証 - XPRIZE/AVATAR 決勝戦への進出 -

春名 正樹^{†1†2} 荻野 正樹^{†2} 田頭 茂明^{†2} 森田 晋^{†1}

概要: 労働力の偏在を解決するために分身ロボット(Avatar)の社会実装が期待されている。労働とは作業だけが必要な業態から、人とのコミュニケーションを必要とする業態まで幅広い。人は作業とコミュニケーションの両立が可能であるが、これを実現する人型の遠隔操作ロボットは現時点では複雑・高価である。本論文では作業とコミュニケーションの両立が可能であり、かつ、低価格な提供を目指した”Augmented Avatar”を提案するとともに、2021年9月フロリダで開催された準決勝を日本チームで唯一勝ち抜き XPRIZE/AVATAR Finalist に選出されたシステムを紹介する。

1. はじめに

20世紀初頭に約15億人であった世界人口は、2000年には61億人に到達し、2011年には70億人、2020年には80億人を超えた。その一方で、日本では人口減少と少子高齢化による労働力不足が懸念されている。空間を超えて作業が可能である遠隔操作技術が人口の偏在を緩和するソリューションとして期待できる[1][2]。労働とは作業だけが必要な業態から、人とのコミュニケーションを必要とする業態まで幅広い。人は作業とコミュニケーションの両立が可能であるが、これを実現する人型の遠隔操作ロボットは現時点では複雑・高価である。本論文では作業とコミュニケーションの両立が可能であり、かつ、低価格な提供を目指した”Augmented Avatar”を提案する。筆者らは作業が可能な最小限の機能を有する Manipulation Avatar と、コミュニケーション伝達の促進のため人身体構造を模倣した Communication Avatar という2つの Avatar をオペレータがシームレスに操作できるシステムを目指している。この試作機と基礎評価を実施して、その有用性を確認した。本システムは2021年9月フロリダで開催された XPRIZE/AVATAR[3] 準決勝を日本チームで唯一勝ち抜き Finalist に選出されている(図1)。

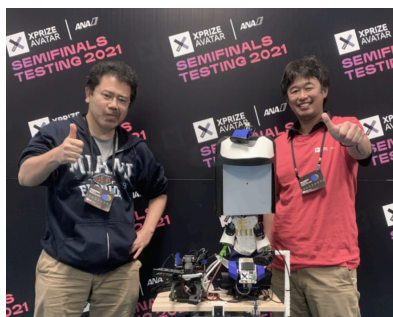


図1 筆者らのチーム LAST MILE[4]
XPRIZE/AVATAR 決勝戦に進出

2. 活躍する Avatar ロボット

遠隔操作は1940年代に放射線環境での作業を目的に研究が始まり[4]、1980年代に電気・計算機技術の進展によりテレグジスタンス[5]やテレプレゼンス[6]に昇華された。近年、スマートフォンやゲーム分野にてVR、AR技術が普及するとともに、通信技術の進展と普及を背景に様々な分野での適用が期待されている。例えば、建設機械を遠隔操作する土木分野、da Vinci に代表される医療分野、及び、Avatarin や Ory Labo Inc.のリモートコミュニケーション分野がある。土木分野の技術は2011年の東日本大震災での福島原発事故時の事例が報告されており、操作インターフェースについては迅速に設置可能な簡便さと、オペレータの事前訓練の重要性が指摘されている[7]。医療分野で導入されている da Vinci Surgical System は患者体内の鉗子を、外科医が操作インターフェースを介して間接的に手術をするシステムであり、術部を最小限に抑えることができる。筆者が米国で体験した da Vinci の操作は専用のコンソールを利用しているがオペレータの操作インターフェースの延長線上に術部内の鉗子が繋がっているような素晴らしい「一体感」を感じる事ができた。リモートコミュニケーション分野では avatarin と Ory Labo Inc.がそれぞれ遠隔コミュニケーションサービスを開始している。avatarin を初のスタートアップとして設立した ANA は2018年に1000万ドルの賞金を出資した XPRIZE/AVATAR の開催を発表し、世界81カ国から820チームが参加し2022年11月に決勝戦がフロリダで開催された[8]。Ory Labo Inc.は障害者の方々が遠隔操作で仕事をする café を設立し運営している。Ory Labo Inc.の吉藤代表と筆者を含む対談において[9]、出演者全員が OriHime を遠隔操作してくれた”マサさん”のプレゼンスを顔と手が動くシンプルな AVATAR を介して十分に感じる事ができた。

^{†1} 三菱電機(株) / 先端技術総合研究所
^{†2} 関西大学 / 総合情報学部

3. Augmented Avatar の提案

これまでに活躍している Avatar はマニピュレーション、あるいは、コミュニケーションに特化していることが多い(図2)。GITAI の G1 や MELCO 試作機[10]の遠隔操作式の人型ロボットの場合、マニピュレーション作業に特化したものであったとしても、その身体構造を利用して周囲にいる人とのコミュニケーションは可能である。ただし、高い出力をもつロボットは、近くでコミュニケーションを行う場合、対面者に心理的な恐怖心を与える。一方、コミュニケーションに特化した ERICA, Orihime は、優れたコミュニケーション機能を有するが、実用的なマニピュレーション作業は不可能である。

本論文では、人のマニピュレーションとコミュニケーションの2つの機能を独立設計した後に、各 Avatar を組み合わせることで人機能を再構成する”Augmented Avatar”を遠隔操作システムとして提案する(図3)。”Augmented Avatar”では、各機能に必要な最小限のシンプルな仕様で設計が可能であり、全体として低価格なシステムを実現することが可能である。また、各機能用に設計された機能特化 Avatar は複数のアプリケーションでの再利用ができるため設計の効率化が可能である。また、人が近くにいる環境で運用される場合に、ハイパワーモータを有した Manipulation Avatar の電源を OFF にすることで安全を確保しながら Communication Avatar で遠隔操作システムを運用することも可能である。提案する Augmented Avatar には以下の特徴がある。

- Avatar 周辺の人への安心感
- 設計の柔軟性と再利用性
- 低コスト

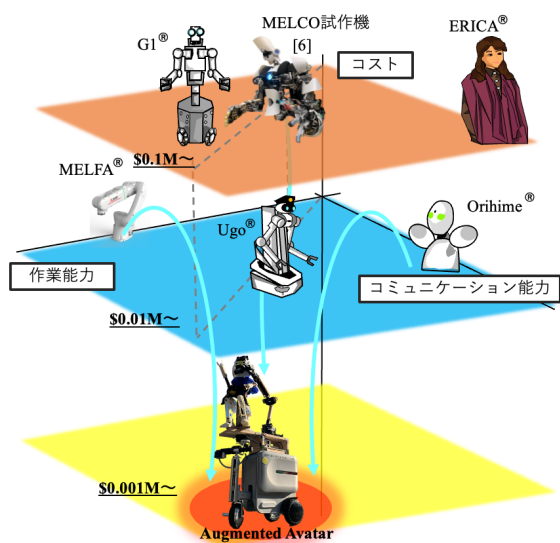


図2 3つの軸(マニピュレーション, コミュニケーション, コスト)と Avatar のポジショニング

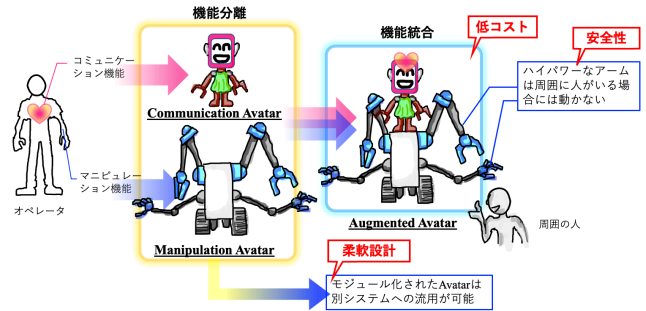


図3 提案する Augmented Avatar

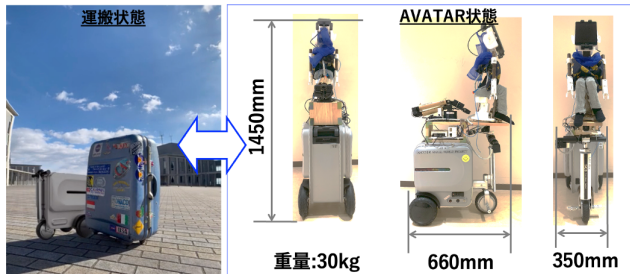
人はトレーニングにより道具を自身の身体図式として獲得することが示唆されている[11]. また、手先を表示すれば身体が透明でも身体所有感を保持することが可能であることも示されている[12]. これらの知見は人の身体所有感や運動主体感の柔軟性を示すものである。このことから、筆者らは提案する Augmented Avatar について、遠隔作業に必要な Manipulation Avatar と、遠隔コミュニケーションに重要な身体図式を有する Communication Avatar を物理的には別身体構造としながら、オペレータは2つの身体を1つの身体として操作できることを目指している。

4. Augmented Avatar の試作 (壱号機)

人のマニピュレーションとコミュニケーションという2つの機能の両立を Manipulation Avatar と Communication Avatar の各機能を分離した2つの Avatar で設計を実施した後に、各 Avatar を組み合わせることで人機能を再構成する”Augmented Avatar”を試作した(図4(a)). Communication Avatar には人のコミュニケーション機能として言語伝達だけでなく、重要性が指摘されている表情やジェスチャーの非言語伝達[13]の機能実装をした。表情はオペレータの顔映像を Communication Avatar の顔部に表示し、ジェスチャーは人の身体構造を簡略化した双腕アームで表現する構成とした。また、周囲に人がいる環境でも安心できるように低出力モータにて設計した。Manipulation Avatar は作業に合わせた出力・速度・駆動範囲等の仕様を満たすアームとハンドを選定、あるいは、設計する。本論文の試作機では作業としてパズルゲームを対象としペイロード 250[g]の WidowX250 Robot Arm (Trossen Robotics)を選定した。本試作機は、各機能に必要な最小限のシンプルな仕様で設計されているため数十万円程度の低価格なシステムである。試作した Augmented Avatar は高さ 1450mm/奥行き 660mm/幅 350mm で、1時間程度の運用が可能なバッテリーを搭載した状態で 30kg である。また、試作した Augmented Avatar は運搬の容易性を実現するために、図4(b)の2つのスーツケースに分解梱包可能であり組立・分解は20分程度で可能である。



(a)



(b)

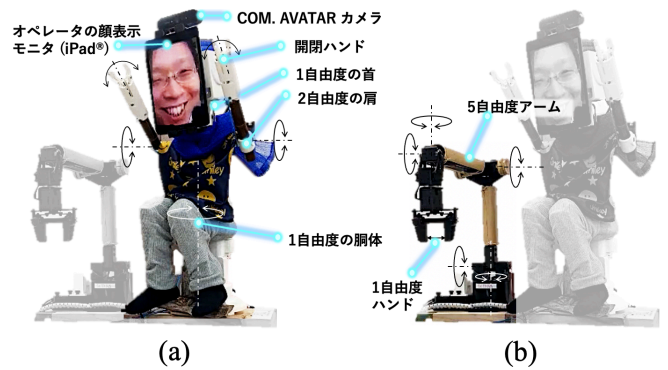
図 4 試作した Augmented Avatar (号機)

4.1 マニピュレーション・アバター

Manipulation Avatar (図 5 (b)) は市販品の WidowX250 Robot Arm (Trossen Robotics) を使用している。250g までの把持・運搬が可能で 5 自由度アームと 1 自由度のグリップが実装されている。図 7 の操作インターフェースではアーム先端の前後・左右・上下の 3 自由度とグリップ開閉操作が可能である。グリップが鉛直下向きとなる制約条件付きの逆運動学計算によりアーム実装される 5 個への指令値が生成されている。これ以外にも定型操作については Motion Button にて予め設計された動作実行が可能である。現在、Communication Avatar との接触回避機能、及び、電流検知によるトルク制限機能を実装し安全を確保している。将来的には周囲の人検知センサとの連携により人との接触の可能性がある場合にはモータ電流値をカットする機能を設けて安全性確保を実施する。

4.2 コミュニケーション・アバター

Communication Avatar (図 5 (a)) は単眼カメラと、遠隔地の人に音声と表情を伝えるための小型モニタ (iPad mini) と、オペレータの非言語伝達をするための腕と手を動かすための電動モータが左右両腕で 4 個、首・胴体の回転に 2 個実装されている (図 4 (a))。オペレータの表情と音声に加えて、腕や顔・胴体の向きを動かすことで遠隔地の人はオペレータの様子を視覚的に理解することが可能となり非言語的な情報伝達の効率化が期待される。将来的にはオペレータ表情からの自動行動生成が可能となる Emotion Engine の搭載を計画しているが、現状は図 7 の操作インターフェースの Emotion Button で予め設計された行動が実行される仕様である。首と胴体は操作インターフェースであるジョイスティックで遠隔手動操作されている。



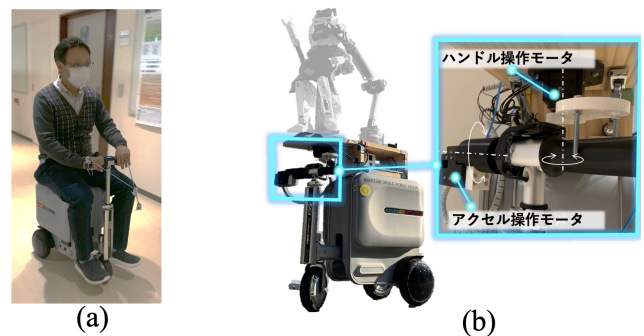
(a)

(b)

図 5 2つの Avatar から構成される Augmented Avatar
(a) Communication Avatar (b) Manipulation Avatar

4.3 移動台車

Mover は市販品の AirWheel® SE3 を改造使用している。改造後も図 6 (a) のように通常の人搭乗での電動運転が可能である。遠隔操作時には図 6 (b) にあるように手動操作部に相当する 2 個のモータを取付けることで前進と左右旋回が可能である。



(a)

(b)

図 6 電動台車 AirWheel® SE3
(a) 搭乗操作 (b) 遠隔操作

4.4 ジョイスティック型操作インターフェース

操作インターフェースの計算機として single board computer (SBC) である Jetson® を利用している。Jetson® には図 7 (a) に示すようにオペレータが視認する操作モニタ、オペレータを撮影するオペレータカメラ、操作入力をするジョイスティック、マイク/スピーカ、及び、通信のための wi-fi が接続されている。操作モニタには図 7 (b) に示すように Communication Avatar にセットされた Avatar カメラ映像、オペレータの撮影状況を確認するオペレータカメラ映像、及び、図 7 (c) に示すように操作モードを選択する mode selector が表示されている。操作モードは communication mode, manipulation mode, mover mode の 3 つが用意されており、モードによるジョイスティックの入力アサインを図 7 (d) とした。具体的な各モードの操作方法を以下に示す。

communication mode

Communication Avatar の視線を操作するために首と胴体をジョイスティックで2自由度操作する。ジョイスティック根元のボタンには、非言語的な情報伝達を促進するための腕や顔・胴体の一連のシーケンスを事前に設定した Emotion Button を用意している。現在の試作機で実装されているシーケンスは各腕の3段階の角度、及び、両腕の同時上下動作である。

manipulation mode

Manipulation Avatar のアーム先端の前後・左右・上下の3自由度とグリップ開閉をジョイスティックで操作する。ジョイスティック根元のボタンでは定型操作を Motion Button にて動作実行が可能である。

mover mode

Mover の前後と左右旋回をジョイスティックにて操作する。Mover のハンドル舵角を視認できるように画面上に進行方向の矢印とハンドル舵角を表示している(図7(e))。これら3つのモードにおいて共通の機能としてジョイスティック根元の回転ノブでジョイスティックの操作量とアバターの動作量のスケール調整する Gain Scaling 機能を設けている。これにより大きな動作から繊細な動作までスムーズに可能となっている。

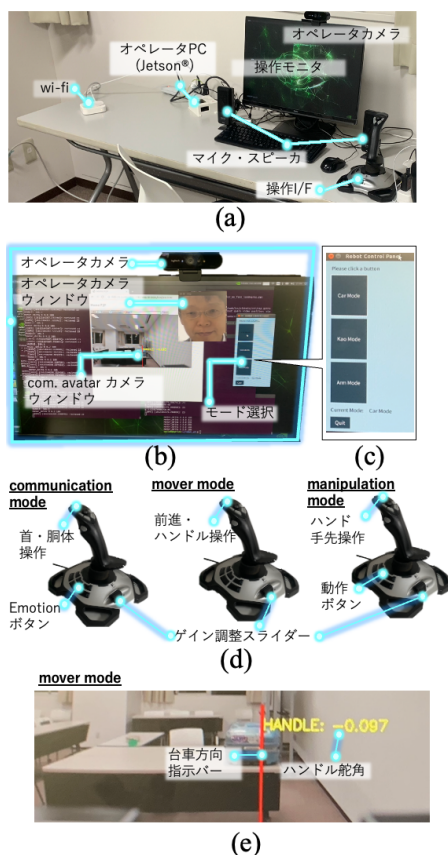


図7 操作インターフェース

- (a) 外観 (b) オペレータモニタ画面 (c) モード選択
- (d) ジョイスティック (e) mover mode 画面

4.5 仮想到達点を利用した半自動操作

試作した操作インターフェースではシンプルさを重視するため3次元での立体視ではなく奥行き知覚が難しい平面モニタを利用している。このため、Manipulation Avatar 操作の際に衝突の危険性があることがオペレータの操作負荷となっている。この課題を解決するために、平面モニタ上に3軸の並進座標を提示しながら、Manipulation Avatar の到達点をCG映像で操作する方法が考えられる。図8(a)は Manipulation Avatar の到達点を表す実機位置を、図8(b)は本説明でターゲットとするパズルピースの”白い羊”を、図8(c)はパズル上の並進座標と操作インターフェースの操作の関係を、図8(d)は仮想到達点(CG)がターゲットとする”白い羊”に到達するまでの一連の操作の一例を示している。図8(d)の0secでオペレータはパズルの上に表示されている青丸の仮想到達点(CG)と実映像であるターゲットとする”白い羊”を見比べて、8secまでの間に仮想到達点(CG)をXY面内でターゲット位置に操作I/Fで移動させ、10secまでの間に仮想到達点(CG)をZ方向に移動させている。この一連の操作において、平面モニタに3軸の並進座標が重畳されていることでオペレータは奥行きを含めターゲット位置まで仮想到達点(CG)を直感的に操作することが出来るとともに、操作している仮想到達点(CG)の青丸は実機ではなくCGであるため衝突の危険がなくストレスがない。最終的に実機の手先到達点が到達すべき空間座標が決定したら、オペレータは実機の動作決定を実行する。動作決定後は Manipulation Avatar の手先到達点が自動的にCGの手先到達点(仮想到達点(CG))で決定した空間座標に移動する。操作時間としてはCGを操作する時間に加えて、実機アームの先端が到達するための応答時間が必要であるが、奥行き情報が得られること、及び、安心して動かせることで、オペレータの操作負荷を低減することができる。

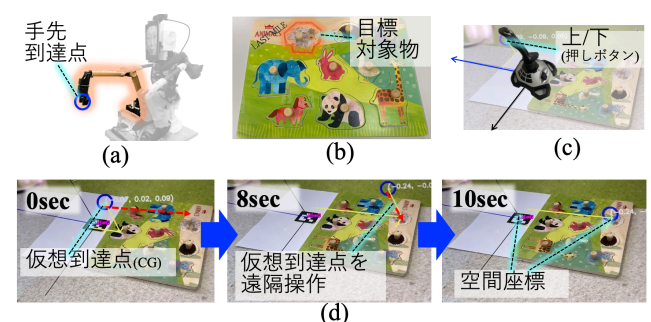


図8 半自動操作モード

- (a) 手先到達点 (b) ターゲット (c) 座標系
- (d) 仮想到達点(CG)の操作の一例

5. 基礎的な検証実験

人は身体表現を重視することや[14], 身体図式の一致が運動主体性や身体所有権の強い感覚を喚起する[15]ことが知られている. これらのことから人型ロボットは, リモートコミュニケーションに有効であることがわかる. 本検証では Avatar の形態の違いが被験者に与える印象の違いについて基礎的な検証を実施する.

5.1 検証方法

インタラクティブなパズルゲームを対象として 5 名の被験者により評価実験を実施した. パズルゲームでは被験者の相手 (以後, レシピエントと記す) と挨拶をした後に, 会話をしながら, レシピエントが指示するパズルを被験者にとってもらう. 本実験では Avatar の役割として図 9 に示すように人, 身体を伴わない画面だけ(iPad mini), 及び, 擬似身体を有する Augmented Avatar の 3 ケースの形態を準備し, 各被験者にはこの順番で合計 3 回の遠隔コミュニケーションの実験を実施した. 5 名の被験者は 20 歳から 50 歳までの男性である. 検証実験中は被験者の振る舞いを確認するためにパズルを置いた部屋での被験者のビデオ撮影と, 実験後は「Q1. 視覚的な馴染みやすさ», 「Q2. 指示伝達のわかりやすさ», 「Q3. 気持ちの伝わりやすさ」の 3 点についてのアンケートを実施する. 被験者への 3 点のアンケートは, 人を対象としたケース (図 9 (a)) を 100 点とした場合の相対値として評価点の回答を指示した.

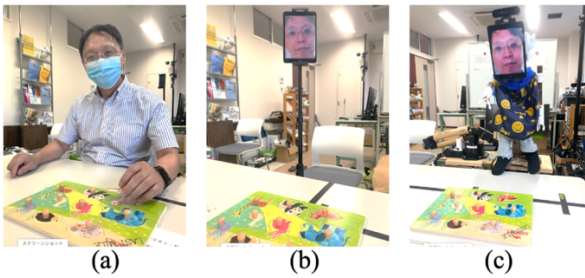


図 9 3つの Avatar 形態
(a) 人 (b) 画面のみ(iPad mini)
(c) 身体図式を有する試作した Augmented Avatar

5.2 検証結果

5 名の被験者アンケートの結果を図 10 に示す. 3 つの質問事項への評価点の平均値として, 人のケースを 100 点として, 身体を伴わない画面だけ(iPad mini)のケースは 52 点であり, 擬似身体を有する提案手法である Augmented Avatar のケースは 77 点であった. 画面だけのケースで「Q1. 視覚的な馴染みやすさ」は 5 名の被験者の平均点は 45 点であり最も低かった. 一方, Augmented Avatar のケースでは「Q3. 気持ちの伝わりやすさ」は 78 点であり最も高かつ

た. 提案手法は人との直接的なコミュニケーションには及ばないが, 画面だけの遠隔コミュニケーションを改善する効果を確認できた.

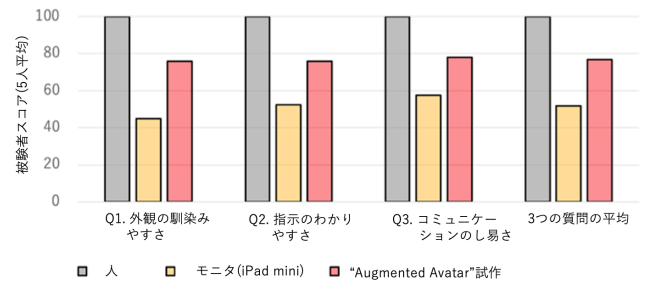


図 10 Avatar 形態がリモートコミュニケーションに与える影響の検証結果 (被験者 5 名)

5.3 考察

試作した Communication Avatar では身体動作が言語伝達だけでなく, 非言語伝達として有効であることを確認した. 被験者実験後のヒアリングでは, 「首や胴体, あるいは手が動くことで, どこを見ればいいのかわかりやすい」という意見が被験者全員からあった. 実験中のビデオを見ると Communication Avatar の腕の動きや首・腰の動きが小さく挨拶の際に, 人のケースでは元気よく手を上げて応答する被験者 (図 11 (a)) でも, Augmented Avatar のケースでは手をあげるのを躊躇している様子が見られた (図 11 (c)). 身体構造や動きについては更なる研究開発が必要である. また, 「Communication Avatar により人の見た目がデフォルメされていると, 普段緊張して話しづらい人とも話がしやすそう」という意見が被験者 4 人からあった. 人との直接的なコミュニケーションではなく, 擬似的な身体を設けることの心理的な効果を含めた研究は興味深い.

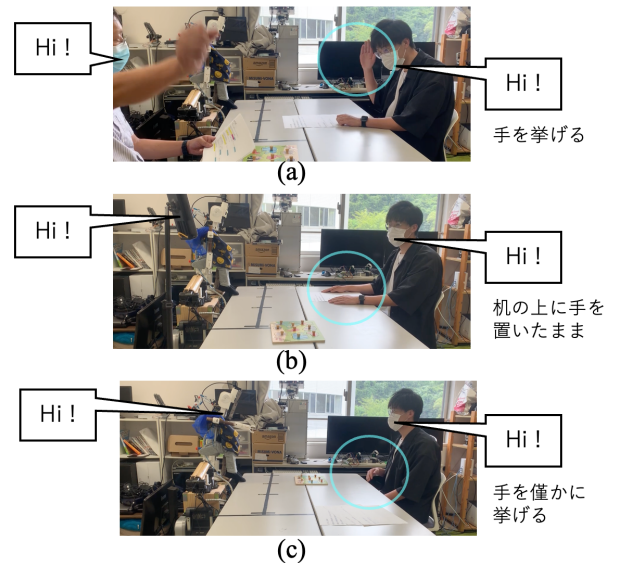


図 11 レシピエントから挨拶された時の被験者の反応

6. XPRIZE/AVATAR 準決勝

ANA が 2018 年に 1000 万ドルの賞金を出資した XPRIZE/AVATAR の開催を発表し[3], 世界 81 カ国から 820 チームが参加し 2022 年 11 月に決勝戦がフロリダで開催された[8]. 筆者らのチームは LAST MILE -Another Small World Project -として, 提案する”Augmented Avatar” (図 1 2) にて大会に参戦した[16]. 参戦に向けて若干の H/W の更新を実施したが基本的な構成は 4 章に記載した通りである. 本大会の特徴として, オペレータは開発者ではなく XPRIZE が用意する初見の審査員であることである. 60 分の練習時間だけでテストに臨む形式である. このため, 人に似た身体構造を有する人型ロボットとヘッドマウントを利用した立体視は直感的操作に有利であると考えられる. 多くのチームが人型ロボットと立体視可能なヘッドマウント式の操作インターフェースで参戦する中, LAST MILE はシンプル・コンパクトをコンセプトに非人型ロボットと平面モニターでの参戦に挑戦した. 準決勝ではコミュニケーションを重視したタスクが多かったことと, XPRIZE が準備する公平かつ, システムのパフォーマンスを最大限に引き出そうとする素晴らしい審査員の方々のお陰で, 2021 年 9 月フロリダで開催された XPRIZE/AVATAR 準決勝を日本チームで唯一勝ち抜き Finalist に選出された[17].



図 12 XPRIZE/AVATAR 準決勝参加の Augmented Avatar 試作機 (壱号機 ver.2)

7. まとめ

空間を超えて作業とコミュニケーションが可能である分身ロボット (Avatar) 技術は, 人口の偏在を緩和するソリューションとして期待を集めている. 筆者らは幅広い業態への適用を目指し, 低価格で作業とコミュニケーションの両立が可能な”Augmented Avatar”を提案し, 試作した. 試作機では XPRIZE/AVATAR 準決勝のタスクを対象にした作業が可能な最小限の機能を有する Manipulation avatar と, 非言語伝達をするための身体構造を模倣した Communication Avatar という 2 つの Avatar をオペレータがシームレスに操作できるシステムを構築した. 遠隔での作

業・コミュニケーション・移動の一連の操作が可能であること, 及び, コミュニケーションを介したインタラクティブな作業について, 非言語伝達を担う身体があることが円滑なコミュニケーションを実現することを確認するとともに, XPRIZE/AVATAR 準決勝では本コンセプトにて挑戦し Finalist に選出された.

参考文献

- [1] M. Haruna et al., “Development of Remote Machine System with Sense of Oneness -Proposal and Principle Verification of Remote Manipulation with Visual Haptics-,” Inf. Process. Society Japan, pp. 448–453, 2020, [Online]. Available: <http://www.interaction-ipsj.org/proceedings/2020/data/bib/1P-74.html>.
- [2] M. Haruna et al., “Proposal and Evaluation of Visual Haptics for Manipulation of Remote Machine System,” Front. Robot. AI, vol. 7, Oct. 2020, doi: 10.3389/frobot.2020.529040.
- [3] ANA, “AVATAR XPRIZE.” 2018, [Online]. Available: <https://avatar.xprize.org/prizes/avatar>.
- [4] R. C. Geortz, “Fundamentals of General-Purpose Remote Manipulators,” Nucleonics, vol. 10, no. 11, pp. 36–42, 1952. “Microsoft Office”. <https://office.microsoft.com/ja-jp/>
- [5] S. Tachi, K. et al., “Tele-existence (I): Design and Evaluation of a Visual Display with Sensation of Presence,” in *Theory and Practice of Robots and Manipulators.*, 1985, pp. 245–254
- [6] S. S. Fisher et al., “Virtual environment display system,” 1987, doi: 10.1145/319120.319127.
- [7] H. Asama, “Remote Control Technology for Response of Nuclear Power Plant Accidents,” J. Robot. Soc. Japan, vol. 30, no. 6, pp. 588–591, 2012, doi: 10.7210/jrsj.30.588..
- [8] avatarin, “「ANA AVATAR XPRIZE」 決勝戦レポート” 2022, [Online]. Available: <https://about.avatarin.com/blog/5977/>
- [9] 三菱電機 (株) “共創ライブ #1 テレプレゼンスロボットによる新たな社会貢献の可能性” 2022, [Online]. Available: <https://metoa.jp/event/live/001/>
- [10] M. Haruna et al., “Comparison of Three Feedback Modalities for Haptics Sensation in Remote Machine Manipulation,” IEEE Robot. Autom. Lett., 2021, doi: 10.1109/LRA.2021.3070301
- [11] A. Maravita and A. Iriki, “Tools for the body (schema),” Trends in Cognitive Sciences. 2004, doi: 10.1016/j.tics.2003.12.008.
- [12] R. Kondo, et al., “Illusory body ownership of an invisible body interpolated between virtual hands and feet via visual-motor synchronicity” Sci. Rep., 2018, doi: 10.1038/s41598-018-25951-2.
- [13] W.-F. Hsieh, et al., “Investigation of Robot Expression Style in Human-Robot Interaction,” J. Robot. Mechatronics, vol. 32, no. 1, pp. 224–235, Feb. 2020, doi: 10.20965/jrm.2020.p0224.
- [14] H. Ishiguro et al., “Robovie: An interactive humanoid robot,” Ind. Rob., 2001, doi: 10.1108/01439910110410051.
- [15] Y. Koyano, et al., “Can the Use of a Human Shaped Communication Robot Enhance Motivation for Inpatient Rehabilitation?” J. Nurs. Sci. Eng., vol. 7, pp. 170–176, 2020, doi: https://doi.org/10.24462/jnse.7.0_170.
- [16] 関西大学, “LAST MILE – Another Small World Project” 2021, [Online]. Available: http://ogilab.kutc.kansai-u.ac.jp/small_world/
- [17] XPRIZE, “FINALIST TEAMS SELECTED IN \$10M ANA AVATAR XPRIZE COMPETITION” 2021, [Online]. Available: <https://www.xprize.org/prizes/avatar/articles/ana-avatar-xprize-announces-finalists>

“Orihime”は株式会社オリエント研究所の登録商標です。

“MELFA”は三菱電機 (株) の登録商標です。

”iPadmini”はアップル社の登録商標です。

“Jetson”はエヌビディアコーポレーションの登録商標です。