

# 異種空間間のコミュニケーションを実現する ロボット型メタポータルMetaPoにおける ロボットハンド・インタラクション

渡辺 圭貴<sup>1,a)</sup> 林田 望海<sup>2</sup> 浦野 健太<sup>2</sup> 米澤 拓郎<sup>2</sup> 河口 信夫<sup>3</sup>

**概要:** 球体ディスプレイ、360度カメラ、ロボットハンドを搭載し、空間間コミュニケーションの統一モデルを構築するモバイルロボット「MetaPo」を提案する。MetaPoは物理空間と物理空間、サイバー空間とサイバー空間、サイバー空間と物理空間のペア間のポータルとして機能し、複数の空間のユーザのためのパノラマコミュニケーションとモビリティ機能による没入型インタースペースマイグレーションを提供する。さらにサイバー空間からロボットハンドコントローラ（RHC）を用いて物理空間のMetaPoに設置されたロボットハンドを操作することで、映像、音声だけでなく、ジェスチャーを加えたコミュニケーションを可能にする。これにより、多人数コミュニケーションにおける問題に対応し、且つ異空間コミュニケーション体験を向上させる。本論文では、MetaPoのコンセプトと最初のプロトタイプ、およびユーザ調査の結果について説明する。

## 1. はじめに

情報技術は、生活空間をサイバー空間、すなわち仮想現実やメタバースに拡張する。また、物理空間のデジタル対応として、デジタルツイン[1]の概念は、スマートシティの文脈で、学術的にも産業的にも多くの研究者を惹きつけている。昨年度には全世代の人々のインターネット利用（SNS、オンラインゲーム含む）の平均時間が、「テレビ視聴時間」のそれを初めて超過[2]した。また、Z世代の33%がオンラインとオフラインの自分の違いはないと回答し、35%はそれらの自分は非常によく似ていると回答した[3]。さらにZ世代の55%は、インターネットはオフラインで経験するよりも創造的な空間であると回答した[3]。このように、物理空間と同様の価値をサイバー空間にもあると考える人が増えており、実際現在のメタバースは、オンラインとオフラインで自己に差異はないという、Z世代の社会的価値に基づいている[4]。また、現在、Rec Room, Altspace VR, VRChat, Horizon Worlds, MozillaHubsなどのソーシャルVRといった、コミュニケーションを行う様々なサイバー空間の利用が増えている。そのため、選択的接触の機会が増加し、異なる空間間の相互理解の低下につながる懸念が

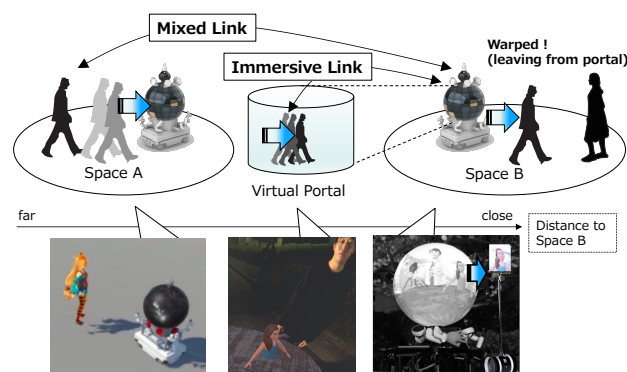


図 1: MetaPo によるコミュニケーションモデル

ある。

このように、様々な空間を接続・統合する手法は、空間間のコミュニケーションやサービスを向上させるために、より重要となっている。物理空間とサイバー空間をつなぐ手法は数多く提案されているが、「分散した物理空間とサイバー空間をつなぐ統一的な方法は何か」という重要な課題が残されている。

本論文では、物理空間とサイバー空間の間をつなぐロボット型メタポータル、MetaPoを紹介するとともに、ロボットハンドを用いたコミュニケーション手法を提案する。MetaPoは物理空間とサイバー空間の両方に設置でき、球体ディスプレイ、360度カメラ、ロボットハンド機能を活用して、両方の空間にいるユーザに統一されたユーザ体

<sup>1</sup> 名古屋大学 工学部

<sup>2</sup> 名古屋大学大学院 工学研究科

<sup>3</sup> 名古屋大学 未来社会創造機構

<sup>a)</sup> yoshiki@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

験を提供する。MetaPo は、ユーザがそれぞれの空間に留まる Mixed Link と、サイバー空間のユーザが物理空間の MetaPo に仮想的に憑依する Immersive Link という 2 段階のリンク空間を提供し (図 1)、Immersive Link の際、サイバー空間のユーザがロボットハンドを操作し、物理空間のユーザにジェスチャーを伝えることができる。一般的に、ジェスチャーを含む非言語コミュニケーションは、社会的相互作用において共有される意味を作り出す、暗黙の対話である。それは感情的、あるいは機能的な意図を保つことがあり、人間のコミュニケーションにおいて伝達される意味の 60% 以上を包含すると推定されている [5]。そのため、映像、音声だけでなく、ジェスチャーを用いたコミュニケーションが大切であり、MetaPo ではロボットハンドを用いることで実現する。

これらの機能・サービスにより、MetaPo は、分散した物理空間とサイバー空間をつなぐポータルとして機能し、ロボットハンドによりコミュニケーション体験を向上させる。今回は MetaPo のプロトタイプを実装しユーザ調査を行った結果、MetaPo の複数空間を繋ぐポータルとして十分な性能をもつことや、ロボットハンド操作システムの有効性を示せた。

## 2. 関連研究

既存の研究では、球体ディスプレイを用いたパノラマコミュニケーション [6] や没入型グループテレプレゼンス [7] など、多人数コミュニケーションのための同様の概念的方法が紹介されている。MetaPo は、ハードウェアとソフトウェアの組み合わせにより、これらのコミュニケーションモードをシームレスに統合し、いくつかのアクチュエーションや、モビリティ機能を追加している。

また、MetaPo では、サイバー空間のユーザと物理空間のユーザのコミュニケーションにロボットハンドを用いる。既存の研究で、コミュニケーションをするにあたって、ロボットと人が同じ空間を共有することが、人にポジティブな影響を与えることが示されている。Li らは、ロボットの物理的な存在が、コンピュータグラフィックベースのエージェントとは異なり、あるいはより強く、人とのインタラクションに影響を与えることを示した [8]。また、コミュニケーションにおいてジェスチャーが人に与える影響について報告されており、Dargue らが、ジェスチャーは言語情報の理解に役立つのか調査した。彼らはジェスチャーを iconic gestures, metaphonic gestures, deictic gestures, beat gestures の 4 つに分類し、その全てが有益であり、全ての種類のジェスチャーが同様に有益であることを示した [9]。また、Shane Saunderson らはロボットの動作から受ける人間の精神の影響について調査し、ロボットがジェスチャーを用いて感情表現することで、感情をうまく伝達できることを示した [5]。

このように、ロボットを用いたコミュニケーションが有効であることは示されているが、これらの研究はロボット対人が 1 対 1 の場合を想定しており、今回の MetaPo のような多対多の状況を想定できていない。この多対多の状況では、「複数人で限られた数のロボットハンドを排他的にどう使うか」、「ロボットハンドを誰が操作しているのかを物理空間のユーザが理解できるのか」という課題が残る。既存の研究で、virtual reality teleoperation の研究はなされており、Matthias らは Leap Motion Controller を用いて、ユーザの上半身のポーズを模倣した直感的な VR ベースのヒューマノイドロボット遠隔操作システムの提案を行なった [10]。この研究では直感的な操作を実現したが、MetaPo のようなシナリオの場合、サイバー空間を動く必要があるため、VR デバイスのコントローラは必須であり、Leap Motion Controller のようなハンドトラッキングセンサーでは機能面で不十分である。また、Zhang らは、VR ベースの遠隔操作セットアップを使用して、深層模倣学習によりロボットに操作タスクを教えた [11]。この際、ロボットのエンドエフェクタは、VR ヘッドセットのモーションコントローラの位置で制御を行なった。しかし、サイバー空間に多数ユーザが存在する場合、誰がロボットを操作しているかが理解しづらいという課題が残る。

## 3. MetaPo

### 3.1 デザイン

MetaPo は、分散した物理空間とサイバー空間をつなぐポータルとして機能する。図 2 に MetaPo のコンセプトデザインを示す。各 MetaPo には対応する仮想ポータル空間があり、サイバー空間のユーザは仮想的に MetaPo に移行できる。これにより、VR デバイスを介した没入型グループテレプレゼンスを実現し、MetaPo プラットフォーム内での様々なアプリケーションを可能にする。1 対多の遠隔コミュニケーションは、その非対称な関係から、双方に心理的な負荷がかかる。つまり、遠隔空間をつなぐアプリケーションは、どのようなサービスであってもマルチユーザ機能を提供する必要がある。そこで、MetaPo では、従来の一対多のコミュニケーションに加え、パノラマ I/O 機能や複数のロボットハンドをサポートし、マルチユーザ体験の実現を目指す。

### 3.2 異空間間コミュニケーション

MetaPo では、Mixed Link と Immersive Link と名付けられた 2 つの基本的な異空間間コミュニケーションモードを定義している。それぞれのモードでは従来のコミュニケーション方式もサポートされているが、以下ではその違いに注目する。Mixed Link は、離れた場所にある空間を対等な関係でつなぐコミュニケーションモードである。それぞれの空間にいるユーザは、自分の体をそれぞれの空間

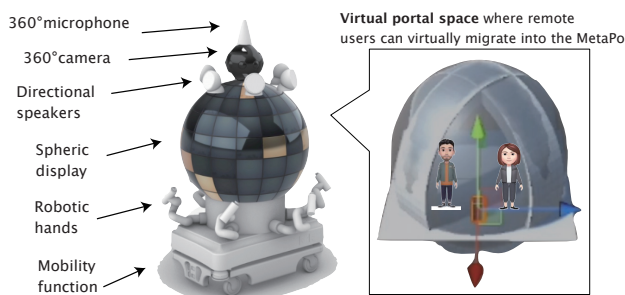


図 2: MetaPo のデザインと仮想ポータル

に置いたまま、パノラマオーディオビジュアルメディアを利用して、別の空間にいるユーザとコミュニケーションをとることができる。Mixed Link では、従来の音声・映像による通話も可能だが、MetaPo では 360 度のハードウェアにより、より広い視野と音声通話を実現する。Immersive Link は、サイバー空間との、より没入感のある形でつながるコミュニケーションモードである。このモードでは、遠隔のユーザは VR デバイスを装着することで、サイバー空間にある MetaPo の仮想ポータルに入る。仮想ポータルには、MetaPo の周囲 360 度のサラウンド映像が投影され、没入感の高いコミュニケーションを実現する。さらに仮想ポータル内に設置したロボットハンドコントローラ（以下 RHC）を用いて物理空間の MetaPo に設置されたロボットハンドを動かすことで、映像、音声に加えてジェスチャーを交えたコミュニケーションを可能にする（図 3）。

図 1 は Mixed Link と Immersive Link の関係を示しており、Mixed Link から Immersive Link に移行することで、空間 A にいるユーザは空間 B に近づくことができる。また、シングルユーザ用テレプレゼンスロボットと連携させることで、ワープモードへと更に移行可能なモデルを実現可能と考えられる。

### 3.3 ロボットハンド操作システム

サイバー空間内に RHC およびその土台を設置し（図 4）、サイバー空間内のユーザが土台の前に立ち、RHC を操作する。直感的な操作を可能にするために、「RHC をつかんで動かす」という単純な操作でロボットハンドの制御ができるようにする。これにより、サイバー空間内のユーザは RHC の数を見るだけで操作可能なロボットハンドの数が分かり、ロボットハンドを排他的に使用できる。また、サイバー空間内のユーザと物理空間のユーザがコミュニケーションをする際には、必ず図 4 のようなサイバー空間内ユーザ-RHC-物理空間ユーザの位置関係となり、物理空間のユーザの目線に RHC 及びその土台が入る。これにより、ロボットハンドが誰が操作しているのが物理空間ユーザから理解しやすくなる。RHC を用いることで多対多の状況で生じる「複数人で限られた数のロボットハンドを排他



図 3: ロボットハンドを用いたコミュニケーションの様子（握手）

的にどう使うか」、「ロボットハンドを誰が操作しているのかを物理空間のユーザが理解できるのか」という課題に対応する。

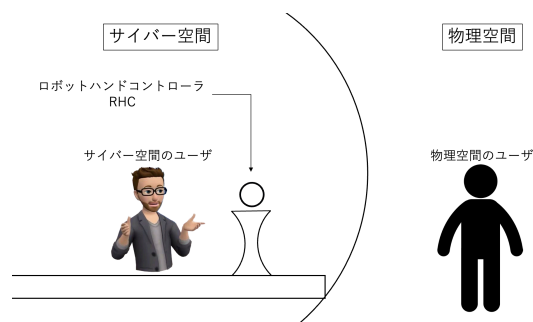


図 4: RHC と各ユーザの位置関係

## 4. プロトタイプとユーザ調査

### 4.1 プロトタイプ

Mixed Link, Immersive Link の 2 つのシナリオを実現するために、MetaPo のプロトタイプを作成した。図 5 にプロトタイプのシステム構成図を示す。本システムでは、以下のデバイスを使用した。

- VR デバイス：Meta Quest2<sup>\*1</sup>
- 360 度カメラ：RICOH THETA V<sup>\*2</sup>
- LED 球面ディスプレイ：SP2.5<sup>\*3</sup>
- ロボットハンド：myCobot 280<sup>\*4</sup>
- 自律移動ロボット：HAKOBOT<sup>\*5</sup>

<sup>\*1</sup> <https://www.meta.com/jp/quest/products/quest-2/>

<sup>\*2</sup> <https://theta360.com/ja/about/theta/v.html>

<sup>\*3</sup> <https://www.hsclcd.com/product/sphere-led-display.html>

<sup>\*4</sup> <https://www.elephantrobotics.com/myCobot/>

<sup>\*5</sup> <https://hakobot.com/>

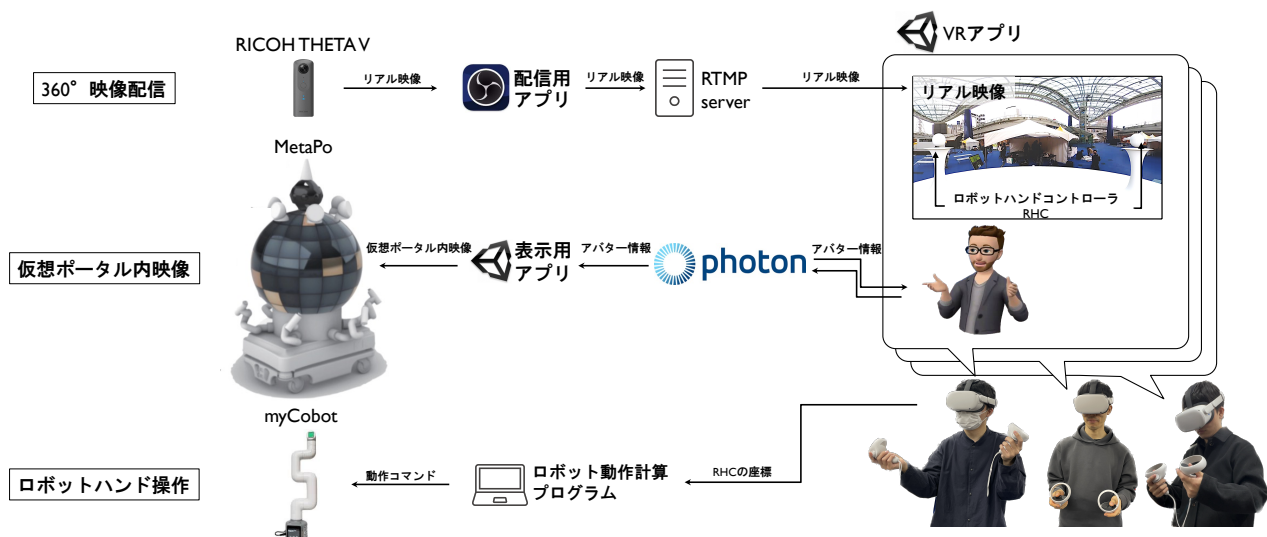


図 5: プロトタイプの実装

#### 4.1.1 マルチユーザシステム

RICOH THETA V を用いてリアルタイム映像を撮影し、それに接続された PC に送信する。そしてその PC から配信用アプリの OBS により RTMP と呼ばれるストリーミングプロトコルを用いてリアルタイム映像が Meta Quest2 にインストールされた VR アプリに送信され、仮想ポータル内で再生される。このように、360 度映像配信を可能にした。また、VR アプリ内のアバターは、meta アバター SDK<sup>\*6</sup>により実装されており、マルチプレイでの同期とコミュニケーションの補助として photon<sup>\*7</sup>を用いた。アバター情報が photon サーバに送られ、photon サーバから他のサイバー空間のユーザが利用している VR アプリに送信される。このようにアバター情報が複数の VR アプリで共有され、リアルタイムに同期される。また、photon サーバからは、物理空間の MetaPo に接続された PC にもアバター情報が送信される。その PC では球面ディスプレイの表示用アプリが実行されており、同期された仮想ポータル内の映像が MetaPo の球面ディスプレイで再生される。これらのシステムによって、マルチユーザシステムを実現した。

#### 4.1.2 ロボットハンド操作システム

図 6 に示す通り、仮想ポータル内にロボットハンド用のコントローラ（以下 RHC）を用意した。VR デバイスを装着したユーザは RHC を持ち、移動させることでロボットハンドを操作する。これにより、RHC の座標が変化する。次に、RHC の座標を、UDP を用いて、myCobot に接続された PC に送信する。PC では受け取った座標からロボットハンドの各関節の角度を定めるプログラムが実行さ

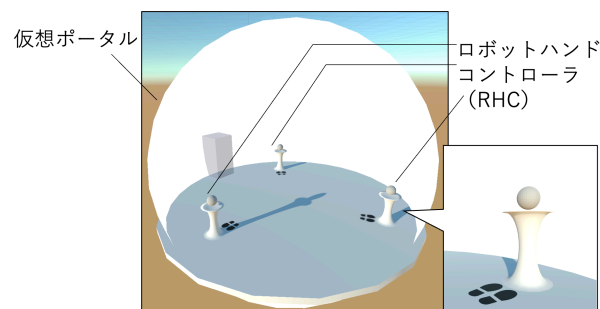


図 6: 仮想ポータル内のロボットハンドコントローラ

れている。これにより、myCobot に動作コマンドが渡され、myCobot が動作する。図 7 のように、コントローラを動かすと、ロボットハンドもそれに追従して動き、それをサイバー空間のユーザは仮想ポータルに映し出された 360 度映像によって確認できる。ただし、現状のプロトタイプでは映像伝送の遅延が最大 4 秒程度生じる場合があり、仮想ポータル内のユーザはロボットハンドの動作の確認するまでに時間差がある。このシステムを用いて、VR デバイスを装着したユーザは、自分の身振り手振りをロボットハンドを用いて遠隔の物理空間にいる相手に伝えることができる。

## 4.2 ユーザ調査

本調査は、令和 4 年 11 月 13、14 日に開催された Hatch Technology Fes.2022<sup>\*8</sup>においてデモ展示を行った際に行ったものであり、参加者には VR デバイスを用いて MetaPo に憑依してもらい MetaPo の体験をしてもらった。体験の流れは以下の通りである。

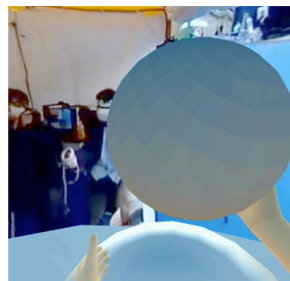
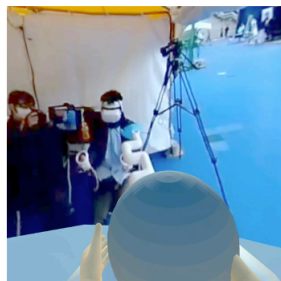
(1) VR デバイスを装着し、サイバー空間に移動する

<sup>\*6</sup> <https://developer.oculus.com/documentation/unity/meta-avatars-overview/>

<sup>\*7</sup> <https://www.photonengine.com/ja/PUN>

<sup>\*8</sup> <https://fes2022.hatch-tech-nagoya.jp/>





(a) コントローラを持つ (b) コントローラを持ち上げる

図 7: ロボットハンドを動かす様子

(上段: ロボットハンド, 下段: 仮想ポータル内のユーザ視点)

- (2) サイバー空間で他のアバターとコミュニケーションを図る
  - (3) サイバー空間に設置された MetaPo に入り, 仮想ポータルへ移動
  - (4) 物理空間に設置された MetaPo の周りの人とロボットハンドを用いてコミュニケーションを図る
- また, ユーザ調査内容は以下の 8 項目である.

- (1) 年齢
- (2) VR デバイスの使用歴
- (3) 体験は楽しかったか
- (4) また使いたい
- (5) 仮想空間との自然なコミュニケーションができたか
- (6) 物理空間との自然なコミュニケーションができたか
- (7) ロボットハンドで何ができたら嬉しいか (複数回答可)
- (8) その他, 意見・要望・感想など (自由記述)

今回の調査では, 133 名 (男性 82 名, 女性 51 名) に参加してもらった. 主なユーザ調査結果を表 1-4 に示す (無回答を含むため, 有効回答数と一致しない).

## 4.3 結果と考察

### 4.3.1 満足度調査

MetaPo の満足度の調査として, 参加者に「また使いたい」について答えてもらった. 結果は表 1 に示した通り, また使いたい (そう思う, やや思う) と感じた参加者が 96.2% と大多数を占めた. これにより, MetaPo は分散した物理空間とサイバー空間をつなぐ統一的な方法として十分に機能していると言える.

表 1: また使いたい

	そう思う	やや思う	普通	あまり思わない	思わない
人数	117	8	3	1	0
割合 (%)	90.7	6.2	2.3	0.8	0

表 2: 仮想空間との自然なコミュニケーションができたか

	そう思う	やや思う	普通	あまり思わない	思わない
人数	56	46	12	9	2
割合 (%)	44.8	36.8	9.6	7.2	1.6

表 3: 物理空間との自然なコミュニケーションができたか

	そう思う	やや思う	普通	あまり思わない	思わない
人数	52	46	14	11	4
割合 (%)	42.3	34.1	11.4	8.9	3.3

### 4.3.2 コミュニケーションの評価

サイバー空間内でのコミュニケーションの評価として, 参加者に「仮想空間と自然なコミュニケーションはできたか」について答えてもらった. 結果は表 2 に示した通り, 自然なコミュニケーションができた (そう思う, やや思う) と感じた参加者は 82% と大多数を占めた. また, ロボットハンドを用いて物理空間とのコミュニケーションの評価として, 参加者に「物理空間との自然なコミュニケーションはできたか」について答えてもらった. 結果は表 3 に示す通り, 自然なコミュニケーションができた (そう思う, やや思う) と感じた参加者が 76% と過半数を占めたが, サイバー空間内でのコミュニケーションの結果より低い結果となった. また, あまり思わない, 思わないのそれぞれの項目についても, サイバー空間内でのコミュニケーションの結果よりも悪い結果となった. これは, ユーザ調査の項目 (8) に, 「物理空間の映像の解像度が低い」といったものや, 「ロボットハンドの動きの認識に齟齬がある」といった意見があったことから, 映像やロボットハンドの操作性が原因と考えられる.

### 4.3.3 ロボットハンドの活用方法の調査

サイバー空間のユーザが物理空間のユーザとロボットハンドを用いてコミュニケーションする際に何ができたら嬉しいかの調査として「ロボットハンドで何ができたら嬉しいか」について答えてもらった. 結果は表 4 に示した通り, 「現実の物体を掴む」が 39.1% で最も多かったことや, その他 (自由記述) の欄に「子供の頭をよしよししたい」や, 「感覚のフィードバックが欲しい」という意見があった. このことから, 物質空間の物やユーザに直接触れる体験することで, コミュニケーション体験の更なる向上が可能だと考えられる.

### 4.3.4 RHC 設置による効果の評価

今回のユーザ調査の際に RHC を導入したことで, 仮想ポータル内のユーザはどの RHC が使われているのかを理

表 4: ロボットハンドで何ができたら嬉しいか

	手を繋ぐ	手を振る	現実の物体を掴む	ハイタッチ	その他 (自由記述)
人数	36	31	70	30	12
割合 (%)	20.1	17.3	39.1	16.8	6.7

解して、1つのRHCが使われていると別のRHCの場所まで移動する様子が確認できた。また、物理空間のユーザもどの仮想ポータル内のユーザがロボットハンドを操作しているのかを理解した様子であった。

## 5. 結論

本論文では、分散した物理空間とサイバー空間の間をつなぐ統一的な方法として、ロボット型メタポータル, MetaPoを提案するとともに、ロボットハンドを用いたコミュニケーション手法を提案した。また、プロトタイプを用いたユーザ調査結果を行い、ユーザ満足度、サイバー空間内、物理空間とのそれぞれのコミュニケーションについてやRHCの効果を検討し、MetaPoが、複数空間を繋ぐポータルとして十分な性能をもつことを示し、RHCを用いたロボットハンド操作システムが多数のコミュニケーションにおける「複数人で限られた数のロボットハンドを排他的にどう使うか」、「ロボットハンドを誰が操作しているのか」を物理空間のユーザが理解できるのか」という課題に対応できることを示した。今後はユーザ調査で得た問題点や改善点のフィードバックをもとに、MetaPoシステムを改善をしていく。

**謝辞** 本研究の一部は、JST CREST JPMJCR22M4 および NICT 委託研究 (01701) の支援を受けたものである

## 参考文献

- [1] Roberto Saracco. Digital twins: Bridging physical space and cyberspace. *Computer*, Vol. 52, No. 12, pp. 58–64, 2019.
- [2] 総務省. 令和3年度総務省情報通信白書. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/html/nd242510.html>.
- [3] Benoit Vatre. Generation z: Identity and expression in the digital world, 2021. <https://medium.com/@bvatre/generation-z-identity-and-expression-in-the-digital-world-50d2b28df829>.
- [4] Sang-Min Park and Young-Gab Kim. A metaverse: Taxonomy, components, applications, and open challenges. *Ieee Access*, Vol. 10, pp. 4209–4251, 2022.
- [5] Shane Saunderson and Goldie Nejat. How robots influence humans: A survey of nonverbal communication in social human-robot interaction. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 11, No. 4, pp. 575–608, 2019.
- [6] Zhengqing Li, Theophilus Teo, Liwei Chan, Gun Lee, Matt Adcock, Mark Billingham, and Hideki Koike. Omniglobevr: A collaborative 360-degree communication system for vr. In *Proceedings of the 2020 ACM Designing Interactive Systems Conference*, pp. 615–625, 2020.
- [7] Stephan Beck, André Kunert, Alexander Kulik, and Bernd Froehlich. Immersive group-to-group telepresence.

- IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 19, No. 4, pp. 616–625, 2013.
- [8] Jamy Li. The benefit of being physically present: A survey of experimental works comparing copresent robots, telepresent robots and virtual agents. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 77, pp. 23–37, 2015.
- [9] Nicole Dargue, Naomi Sweller, and Michael P Jones. When our hands help us understand: A meta-analysis into the effects of gesture on comprehension. *Psychological Bulletin*, Vol. 145, No. 8, p. 765, 2019.
- [10] Matthias Hirschmanner, Christiana Tsiourti, Timothy Patten, and Markus Vincze. Virtual reality teleoperation of a humanoid robot using markerless human upper body pose imitation. In *2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 259–265, 2019.
- [11] Tianhao Zhang, Zoe McCarthy, Owen Jow, Dennis Lee, Xi Chen, Ken Goldberg, and Pieter Abbeel. Deep imitation learning for complex manipulation tasks from virtual reality teleoperation. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5628–5635. IEEE, 2018.