

ユーザの位置と動きを伝えるテレプレゼンスロボット 相互利用環境における遠隔相互作用の検討

佐々木 孝輔^{1,a)} 袁 子杰¹ 井上 智雄^{2,b)}

概要: 協調作業を行う際、作業者は様々な情報を共有する必要がある。特に空間内の移動を含む協調作業では、作業者は相手との位置関係や相手の行動などの情報によって、自身の行動を決定、実行する。本研究では、遠隔地点の相手の位置と行動をロボットおよび相手映像により伝える双方向のテレプレゼンスロボット環境を提案し、遠隔協調作業の支援可能性を検討した。提案環境において協調行動の例として遠隔作業相手とのすれ違い実験を行った結果、相手映像のある場合にはその映像をよく見て行動することが分かった。

キーワード: 協調作業, 位置関係, ノンバーバル情報, テレプレゼンスロボット

Investigation of Remote Interaction in an Environment of Mutual Telepresence Robots that Keep Same Positions and Motions of Users

KOSUKE SASAKI^{1,a)} ZIJIE YUAN¹ TOMOO INOUE^{2,b)}

1. はじめに

我々は様々な協調作業を行いながら生活をしている。協調作業には会話や会議、組み立て作業からスポーツや演劇、ダンス、演奏活動など様々な作業が含まれる。これらの協調作業では様々な情報の共有が必要であり、協調作業を遠隔化するためにはそれらの情報を遠隔地間で共有することが求められる。

本研究では、演劇やスポーツ、ダンスなどの作業者が空間内を移動する協調作業を考える。これらの協調作業では、作業者が移動を繰り返すため作業者同士の位置関係が刻々と変化する。例えばダンスでは、観客から見たときに整って見えるよう作業者は互いの位置関係を覚える必要がある、またスポーツでは相手との位置関係に応じて攻め方

や守り方を決定する。これらの協調作業を行う場合、変化する互いの位置関係を常に把握する必要があるほか、相手の行動を把握することも重要である。本研究では遠隔環境下における協調作業に着目し、協調作業相手の位置関係と相手の行動の様子などのノンバーバル情報を互いに伝達しあうことで、作業者の自身の行動決定と、その行動を実行する支援を行う。

遠隔地間での協調作業を支援するために、物理的な身体を持つロボットを使用する研究がある。これらの研究では、作業者の動作を遠隔地にあるロボットに反映することで協調作業を支援するが、反映される動作はロボットが再現できる動作に限定されるため、ロボットと対面している作業者に伝達される情報も限定される。

この問題を解決するために、遠隔2地点の作業環境にRGBカメラを搭載した移動ロボットを配置し、双方向に位置情報と相手の映像を伝達する双方向テレプレゼンスロボットを用いた遠隔協調作業支援手法が提案する [1]。遠隔作業空間に配置されたロボットは遠隔作業者の位置を反映して動き、相手との相対的な位置を作業者に把握させる。また作業者は、ロボットに取り付けたカメラの映像を表示するHMDを装着することで、遠隔地にいる相手の姿を視

¹ 筑波大学大学院図書館情報メディア研究科
Graduate School of Library, Information and Media Studies, University of Tsukuba, 1-2 Kasuga, Tsukuba, Ibaraki 305-8550, Japan

² 筑波大学図書館情報メディア系
Faculty of Library, Information and Media Science, University of Tsukuba. 1-2 Kasuga, Tsukuba, Ibaraki 305-8550, Japan

a) kasaki@slis.tsukuba.ac.jp

b) inoue@slis.tsukuba.ac.jp

認することができる。遠隔地点にいる互いの作業者の位置と姿が双方向に伝達されるため、従来の身体を持つロボットでは伝わりにくい、遠隔作業者の動作を含む視覚的な情報を伝達できる。本論文では、二者間の遠隔協調作業の一例として、二者が互いに歩み寄ってすれ違うタスクを双方向テレプレゼンスロボットを用いて行い、テレプレゼンスロボットが提示する情報の効果を検討した。両作業者が遠隔地のロボットに双方向に没入する双方向テレプレゼンスロボットと、一方の作業者だけが遠隔地のロボットに没入する片方向テレプレゼンスロボットを比較した結果、作業者は相手の姿、特に上半身を見ることで次の相手の行動を予測することが示唆された。

2. 関連研究

2.1 平面ディスプレイを用いた遠隔協調作業支援

対面環境と異なり、遠隔環境では視線の情報や身体の動きなどの、視覚的なノンバーバル情報が欠如することがある。ノンバーバルな情報はコミュニケーションを円滑に行うために重要なものであるため、これまで視覚的なノンバーバル情報を互いに伝えつつ、遠隔地間で協調作業を行うための研究が行われている。

平面ディスプレイを用いた研究では、ユーザの視線情報を用いた遠隔会議システムや [2]、共通の作業場や背景などを映すことにより、映像内で同じ空間にいるように演出するシステムがある [3], [4]。また遠隔地の相手を、表示するディスプレイの背景に重ねて表示させる方法 [5] や、等身大の大きさでユーザの姿を表示することが可能なディスプレイにユーザを表示させる方法 [6] もある。いずれも、相手と同じ空間にいるかのようなコミュニケーションをとることができる。他にも、ディスプレイを用いず遠隔地の相手の映像をプロジェクションすることによってノンバーバル情報を伝えようとする研究もある [7], [8], [9]。しかし平面ディスプレイを用いた方法では、ユーザが座るもしくは立つなどの状態での使用が前提となり、身体の動作に大きな制限がかかる。これらの方法では、空間移動を伴う遠隔協調作業を支援することはできない。

2.2 AR, MR, VR 技術を用いた遠隔協調作業支援

移動の制限の問題を解決する方法として、HMD を用いた AR や MR, VR 技術を用いたシステムも提案されている。遠隔地の相手と同一の仮想空間に没入することによって遠隔での協調作業を支援するシステム [10], [11] や、遠隔作業空間の様子を表示することで没入するシステム [12]、HMD に映る映像を相手の視点や俯瞰映像などの複数地点からの映像に切り替えられるシステム [13] などがある。さらに HMD 内に表示される映像に、作業相手の姿をアバターにして表示し協調作業を行うシステムが数多く報告されている [14], [15], [16], [17]。このようにディスプレイの

位置という制限がなくなったため、AR, MR, VR 技術はユーザの移動の制限を軽減できる。しかし、仮想空間で作業が行われるシステムではユーザが物理的な身体を持たず、実空間へのインタラクションを行うことはできない。さらにアバターを用いるシステムでは、アバター化される前のユーザが持つノンバーバルな情報を欠落させる可能性があるといった問題が残る。

2.3 テレプレゼンスロボットを用いた遠隔協調作業支援

物理的な身体をもつロボットを用いて、遠隔地にいる相手と協調作業を行うテレプレゼンスロボットの研究がある。テレプレゼンスロボットの研究では、ロボットに様々な機能を持たせることによって物理的な作業を可能としている。例えば、Adalgeirsson らが開発した MeBot [18] や、Kawanobe らが開発した iRIS [19] は、ユーザの頭の動きに連動してロボットの頭部と、頭部に装着されたディスプレイが動き、相手の視線情報を伝達することができる。このような技術では、例えば遠隔地間での会議において会話中の話題の対象を特定しやすくし、受け答えにかかる時間が短縮されるなど、協調作業にかかる効果が確認されている。またリモートユーザがロボットに没入することで一人称の視覚、聴覚を得ると同時に、ロボットにリモートユーザの顔を表示させたり、同じ腕の動きをさせたりすることで、ロボットと対面で作業を行うローカルユーザにプレゼンスを与えるシステムも提案されている [20], [21]。遠隔での物理的な作業を可能とする研究としては、作業者の手の動きに合わせてロボットの手を動かすことで遠隔地にいる相手と握手をしたり [22]、遠隔 2 地点にユーザの腕の動きを模倣するロボットを設置し、ユーザの動作を双方向で遠隔地のロボットに反映させることで、2 地点で同時に物理的協調作業を行うことを可能にしたりする研究 [23] もある。これらの研究のようにロボットがユーザの代わりに動くことで、遠隔地にいながら様々な協調作業を行うことができる。

自走が可能なロボットであれば、さらに空間内の位置をユーザに提示することも可能なことから、実空間インタラクションを可能にし、さらに空間内の移動が制限されることなく遠隔地間で協調作業を行うことができる。しかし、遠隔地にいるユーザの動作はそのロボットが再現可能な動きに限定され、ノンバーバルな情報が全て伝わらない可能性がある。またこれまでのテレプレゼンスロボットは、片方のユーザがもう一方のユーザがいる地点に配置されたロボットに没入するだけであって、双方向にノンバーバルな情報をやり取りしてはいなかった。

本研究では、自走可能な移動ロボットを用いつつ、複雑な挙動ができないようなロボットでもノンバーバルな情報を伝達しつつ遠隔協調作業を支援する手法として、遠隔地に 1 台ずつ 360 度カメラを搭載した移動ロボットを配置し、カメラの映像を互いの遠隔地にいる作業者が装着した

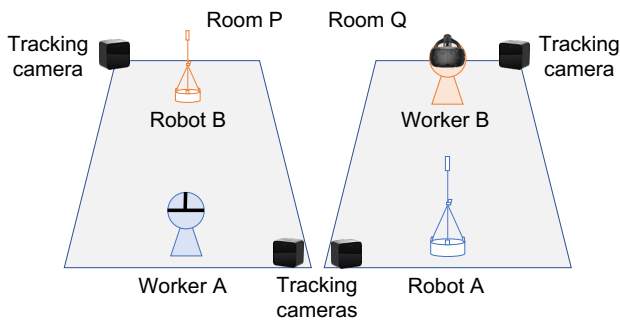


図 1 双方向テレプレゼンスロボットの概要図

Fig. 1 An overview of the bi-directional telepresence robots

HMD に表示させる, 双方向テレプレゼンスロボット [1] を提案する. この双方向テレプレゼンスロボットは, 固定式ディスプレイやスクリーンを用いた場合のような移動の制限はなく, 実空間へのインタラクションを可能にし, かつカメラに映った視界をそのまま HMD に提示するため, ノンバーバルな情報を保持できるといった特徴がある. 本研究では, これまでに行われていない双方向テレプレゼンスロボットの効果を, 従来のような片方向にのみ情報を提示するテレプレゼンスロボットと比較することで検討した.

3. 双方向テレプレゼンスロボット環境

本研究で提案する双方向テレプレゼンスロボット [1] を用いた概要図を図 1 に示す. 遠隔 2 地点にいる作業者の前にはそれぞれ, 図 2 に示す 360 度カメラを搭載した移動ロボットが 1 台配置されている. 移動ロボットは遠隔地にいる作業者の位置に合わせて移動を行う. 例えば Worker A が前進した場合, Robot A も前進する. これを双方向で行い, 2 つの作業空間で作業者の位置関係を同期する.

また両作業者は HMD を装着し, 相手の作業者の前に設置された移動ロボットのカメラからの映像が提示される. そのため, Worker A は HMD を通じて Robot A のカメラが取得した Room Q にいる Worker B の姿を見ることができ, Worker B も HMD を通じて Room P にいる Worker A の姿を確認することができる. 図 3 に, HMD を通じて提示される遠隔地点にいる作業者を映し出した映像を示す.

この双方向テレプレゼンスロボットを用いた環境は, 双方の作業者が遠隔地にいる相手との位置関係を共有することを可能にし, また作業者は互いに相手の姿を見ることができ, 視覚的な相手の動作を伝達も可能にしている. そのため, 双方の作業者が動きながら相手との位置関係を把握しつつ, 相手の行動予測に必要な予備動作を認識しながら作業を行う環境を実現できると期待できる.

4. テレプレゼンスロボットの実装

4.1 システムおよびロボットの構成

双方向テレプレゼンスロボット環境を次のように構築し

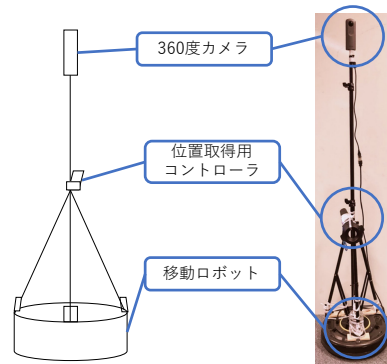


図 2 テレプレゼンスロボットの外観

Fig. 2 The telepresence robot

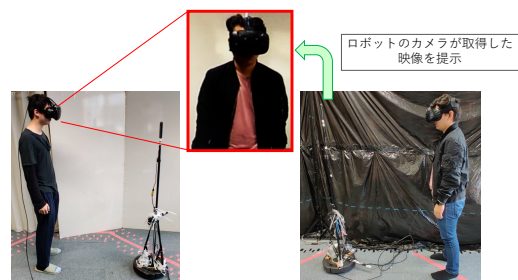


図 3 作業者の HMD に表示される映像

Fig. 3 The view in HMD

た. まず図 1 に示すように, 同じ大きさ, 形の作業空間を遠隔 2 地点に用意し, それぞれに HMD を装着した作業者とテレプレゼンスロボットを配置する. また各作業空間の対角線上に 2 つずつ, 位置の基準を定めるためのトラッキングカメラを設置する. 取得した作業者およびロボットの位置と向き情報は処理用の PC へと送信される. その後処理用の PC は遠隔地の作業者の位置に合わせてロボットを移動させるためのコマンドを, 各ロボットに送信する.

作業者が装着する HMD, テレプレゼンスロボットに取り付けるコントローラ, それらの位置及び向きの取得のためのトラッキングカメラは HTC 社の VIVE を使用した. VIVE はトラッキングカメラから射出される光レーザを, HMD やコントローラに組み込まれているセンサで受信することで位置や向きの情報を取得している.

また図 2 に示す移動ロボットには, iRobot 社の iRobot Create 2 を用いた. iRobot Create 2 は任意の向きへの回転及び前進と後退が可能な移動ロボットである. また搭載された 2 つの車輪に別々の動作命令を行うことができ, 片方の車輪の速度をもう一方の車輪より遅くすることで, 回転しながら前進するという動作を実現することもできる.

この移動ロボットの上に高さの調節が可能なカメラ用の三脚を設置する. 三脚には, 移動ロボットの位置と向きを取得するための VIVE コントローラを取り付ける. そして三脚の先端に, 作業者に提示する一人称視点の映像撮影用カメラとして, RICOH 社の 360 度カメラである Theta V を取り付けた. 360 度カメラを用いることにより, 作業者

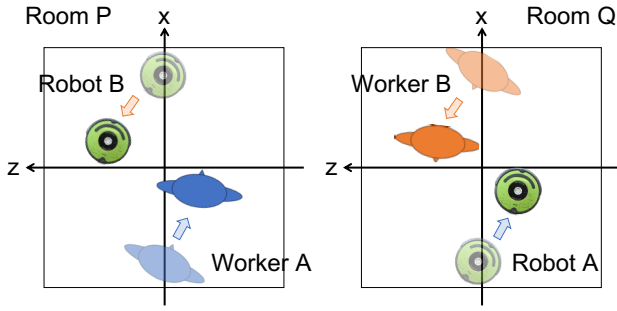


図4 ロボットの位置同期

Fig. 4 Synchronization between the workers and robots

の向きに合わせてカメラそのものを移動させる必要はなくなり、作業者の微細な動きに合わせてHMDに提示する視野を調整することが可能になる。

4.2 作業者とロボットの位置同期

本システムにおいて、作業者とロボットの位置を一致させるために、2つの作業空間に同一の座標系を用意し、それぞれの作業者の位置をUnity上の x 座標、 z 座標で表す。作業者の位置と向きを取得した処理用PCは、Room Pの座標系におけるWorker Aの位置座標と向き情報をRoom QにあるRobot Aに、Room Qの座標系におけるWorker Bの位置座標と向き情報をRoom PにあるRobot Bにそれぞれ送信し、各ロボットはその位置と向き情報をもとに移動する(図4)。

4.3 位置情報の同期方法

2地点の作業空間にはそれぞれ処理用のPCがあり、1台をサーバ、もう1台をクライアントとしたWebSocket通信により、0.2秒に1回座標情報を送り合い、この座標情報をもとにテレプレゼンスロボットは移動を行う。作業者は方向転換と前後移動を同時に行うことができるのに対し、ロボットは進行方向へ回転してから前後移動を行うという動作を行っていたところ[1]を、本システムではロボットの移動において回転と前後移動を同時に行うとともに、ロボットの移動に作業者の移動先を予測した情報を用いて、作業者と対応するロボットの位置のずれをより少なくした。

作業者の移動先の位置予測は既存手法[24]に基づき次の手順で行った。まず、時刻 t の作業者の位置 P_t について、 $N-1$ フレーム前から $\frac{N}{2}$ フレーム前までの平均位置と、 $\frac{N}{2}-1$ フレーム前から現在フレームまでの作業者の平均位置を求める。その後、この2つの平均位置の差を、平均位置間の経過フレーム数 $\Delta t = \frac{N}{2}$ で除することで相対的な速度ベクトルを求め、 s 秒後の作業者の位置 P_{t+s} を予測する(式1)。なお本システムでは、1秒間に22フレームの位置情報取得が可能のため、 N の値は22とした。

$$P_{t+s} = \frac{\frac{1}{\frac{N}{2}} \sum_{j=t-\frac{N}{2}+1}^t P_j - \frac{1}{\frac{N}{2}} \sum_{j=t-N+1}^{t-\frac{N}{2}} P_j}{\Delta t} s + P_t \quad (1)$$

また各作業空間内の座標は、システムを動作させるUnityにより、図4および図5左に示す通り z 軸と x 軸が左手系で定義されている。時刻 $t+s$ 秒の作業者の予測された位置の z 座標を P_{t+s}^z 、 x 座標を P_{t+s}^x とし、対応するテレプレゼンスロボットの時刻 t の座標系中の角度を α [deg]、 z 座標と x 座標をそれぞれ R_t^z と R_t^x とおき、ロボットが作業者の予測位置に移動するために必要な回転角度 β [deg]を算出する。ただし、式2中の下線部はUnityにより弧度で出力されるため、度数に変換するために $360/2\pi$ を乗じている。また β が負数になるとき、360を加算することで出力される β が $0 \leq \beta < 360$ を満たすようにする。

$$\beta = \alpha - \arctan \frac{P_{t+s}^z - R_t^z}{P_{t+s}^x - R_t^x} \times \frac{360}{2\pi} \quad (2)$$

回転しなければならない角度 β について、図5右に示すようにロボットの移動を制御した。 β の角度が 355° 以上 360° 未満もしくは 0° 以上 5° 以下のとき、回転は行わず前進を行う。 β が 315° より大きく 355° 未満もしくは 5° より大きく 45° 未満のとき、回転を行いながら前進する。 β が 270° 以上 315° 以下または 45° 以上 90° 以下のときは回転だけ行い、前進もしくは後退は行わない。

また、作業者の s 秒後の予測位置とロボットの現在位置の距離 d を求める。

$$d = \sqrt{(P_{t+s}^x - R_t^x)^2 + (P_{t+s}^z - R_t^z)^2} \quad (3)$$

ロボットの動作を素早くしつつも、ロボットの転倒を防ぎ、また360度カメラの揺れを抑えるため、作業者の予測位置とロボットの現在位置の距離 d に応じて、ロボットの前進・後退速度を変化させた。ロボットの移動速度は実験的に検証し、 d が10cm以上30cm未満のとき10cm/s、30cm以上50cm未満のとき26cm/s、50cm以上のとき30cm/sとした。また d が10cm未満となったとき、前進・後退・回転のいずれの動作も行わないものとした。これは、微細な作業者の動作によりロボットが細かく動き、ロボットに搭載されているカメラが頻りに揺れることを防ぐためである。

4.4 作業者への映像提示

各作業者が装着しているHMDに映し出される映像は、遠隔地において作業者と同期移動するロボットに設置した360度カメラからの一人称視点映像であり、図3のように表示される。それぞれの地点においては作業者の前にロボットが存在するが、遠隔地のロボットからの一人称視点を没入型のHMDにより見ているため、作業者は目の前のロボットを視認できない。

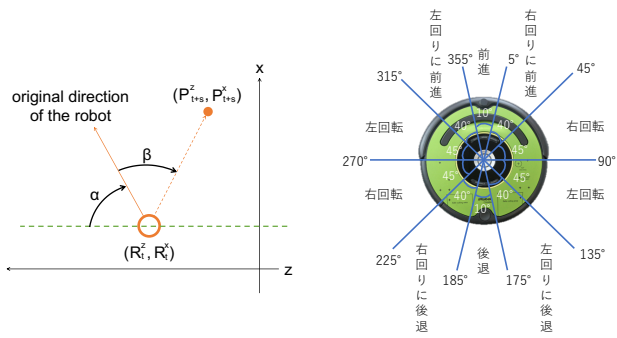


図 5 (左) 作業空間の座標軸 / (右) ロボットの移動制御

Fig. 5 (Left) coordinate axes of the working space / (Right) Operation of the robot

また本システムでは、作業者が起立した状態の目線に合わせて設置した 360 度カメラがロボットに固定されている。そのため作業中は、ユーザがジャンプする、しゃがみ込むなど座標系に対し鉛直方向に移動しても、HMD 内の視界の高さは変わらない。本研究では演劇、スポーツ、ダンスなどの空間内を移動しながら行う協調作業を考えているが、協調作業空間内での作業者の平面的な位置関係を、移動ロボットにより再現することの効果に着目している。このため、現時点では鉛直方向の視点の移動には対応していない。

なお本システムで使用した HMD の VIVE は視野角が 110 度である。人間の視野は水平方向におよそ 200 度あるが、情報受容能力に優れる有効視野は 30 度に過ぎず、注視点素早く安定して見える安定注視野も 60~90 度しかないため [25]、ユーザは比較的ストレスなく周囲を見渡すことが可能である。

また本システムでは、移動ロボットと作業者の顔の向きがそれぞれの座標系内で一致するように、ロボットは回転動作を行う。しかし、4.3 節で述べたように、ロボットは状況により動作を停止することがあるため、ロボットの角度と作業者の顔の向きが一致しなくなることがある。また作業者が顔を上下に動かさず場合、ロボットのカメライは物理的に角度を変えることはできない。このような場合、カメラの正面の向きと作業者の顔の向きに差異が生じるが、HMD に表示される映像は、常に作業者の顔の向きと同じ角度の視野が表示されるようにした。なおロボットが撮影した映像は、WebRTC 技術を用いて HMD に送信される。そのためカメラが映像を取得してから HMD に表示するまでに遅延が発生する。この遅延は 16 回の計測平均で 0.43 秒 (SD : 0.10 秒) であった。

4.5 ロボットの追従性能と提示される映像のずれ

作業者の位置予測がなく、テレプレゼンスロボットの移動方式が異なる先行研究 [1] (以下、従来システム) と本研究のシステム (以下、本システム) の追従性能がどの程度

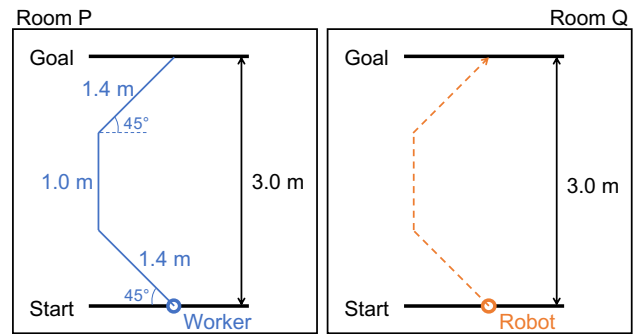


図 6 テストのための歩行ルート (Room P の青線)

Fig. 6 Route for the test is indicated by the blue line in the room P.

異なるかテストした。またテストの結果から、本システムのロボットの追従性能による位置のずれと WebRTC による映像伝送の遅延により、作業者には実際の位置とどの程度離れた距離の映像が提示されるか計測した。

まず Room P に作業者を、Room Q に移動ロボットを配置する。Room P の床面には図 6 に示すように、すれ違い時の移動を想定した歩行ルートを示すテープが貼られている。作業者は HMD を床面に向けながら把持し、床面のテープに沿って歩行ルートをたどり、直線距離で 3.0m 離れたゴールラインに向かって歩く (実際の移動距離は歩行ルートに従い約 3.8m)。このとき、Room Q に配置されたロボットも作業者と位置を同期するよう動く。作業者が手に持っている HMD は床面に向いているため、移動ロボットからはロボットの足元の映像が HMD に提示される。

このテストを従来システムと本システムで、それぞれ 10 回試行した。10 回のうち 5 回は図 6 に示す歩行ルートで、もう 5 回は図 6 を左右反転した歩行ルートで実施し、作業者がゴールラインに到達した時点での、作業者の歩行時間、ロボットの位置、および HMD に提示された映像を取得した。従来システムを用いたときの作業者の歩行速度は平均して 28.3cm/s (SD : 3.26cm/s)、ロボットの移動速度は 17.0cm/s (SD : 1.98m/s)、作業者の歩行時間は 13.7 秒 (SD : 1.64 秒) であり、本システムを用いたときの作業者の歩行速度は 32.3cm/s (SD : 2.83cm/s)、ロボットの移動速度は 27.6cm/s (SD : 1.26cm/s)、作業者の歩行時間は 11.9 秒 (SD : 1.15 秒) だった。

まず追従性能を測るために、作業者がゴールした時点での、作業者とロボットの距離を作業者の歩行時間で除して、単位時間あたりの作業者・ロボット間の距離を求めた。10 回の試行の平均値は、従来システムでは 11.26cm/s (SD : 3.68cm/s)、本システムでは 4.63cm/s (SD : 2.37cm/s) だった。この結果から、4.3 節で述べたロボットの転回時の移動方法の変更および作業者の位置予測によって、作業者と移動ロボットの位置のずれが小さくなったことが分かる。

また、本システムでの作業者の歩行速度 $v_w = 32.3$ (cm/s)

およびロボットの移動速度 $v_r = 27.6$ (cm/s) から、時刻 t (s) 時点の実際の作業者の位置と HMD を通して表示される位置の差を表す。まず時刻 t 時点の作業者の歩行距離は $v_w t$ で表される。また WebRTC の遅延により作業者には $delay (= 0.43)$ 秒前の映像が提示されるため、HMD 上には時刻 $(t - delay)$ 時点のロボットの位置の視野が表示される。その時点のロボットの移動距離は $v_r(t - delay)$ であることから、作業者・HMD 表示上のロボット間の距離は $v_w t - v_r(t - delay)$ (cm) と表される。したがって、作業者の位置と HMD を通してユーザが見る位置は、 $t \geq delay = 0.43$ のとき $4.7t + 11.9$ (cm) ずれる。また $0 \leq t \leq delay = 0.43$ のときは、作業者は HMD を通して、まだ開始地点から動いていないロボットからの映像を見るため、 $v_w t = 32.3t$ (cm) ずれて見える。

5. 実験

5.1 すれ違い実験

双方向テレプレゼンスロボットを用いたシステムが遠隔環境下で、空間内の移動を伴う協調作業を支援できるか検討するために、システムを用いてすれ違いタスクを行った(筑波大学図書館情報メディア系研究倫理審査委員会通知番号第 29-144 号)。このタスクを含め、空間内の移動を伴う協調作業において、作業相手の位置や予備動作を認識することは重要である。この実験から得られる知見は、他の空間内の移動を伴う遠隔協調作業の支援にも役立つと考える。この実験では、本システムによる位置関係や動作の伝達の効果について、作業者たちの行動の変化を通じて評価する。

本研究で行った実験タスクは図 1 に示す通り、遠隔 2 地点にいる Worker A と B が、Robot B, A とすれ違うものである。各作業空間には 2 本のラインが 3.0m 離れて引かれており、図 7 に示すように、各ライン上に z 座標が同じになるよう、作業者のスタートポイント (W_{SP}) とロボットのスタートポイント (R_{SP}) を定める。実験者のスタートの合図とともに、2 地点の作業者は 3.0m 先の作業者ゴールラインを目指して歩き出す。このとき、それぞれのロボットも位置同期して動き出すため、各作業空間では作業者とロボットが向かい合わせで歩み寄る。その後衝突を回避するために作業者とロボットは進行方向を少しずらしながら前進する。最終的に両作業空間において、作業者の身体が作業者ゴールライン (W_{GL}) を越え、かつロボットの本体がロボットゴールライン (R_{GL}) を越えた瞬間をゴールとし、スタートからゴールまでの作業者の行動を観察した。

5.2 実験条件

本研究で行った実験では、作業者が互いの遠隔作業空間にあるロボットに没入する条件を遠隔ビデオ条件とし、対照条件として片方の作業者のみが遠隔作業空間のロボット

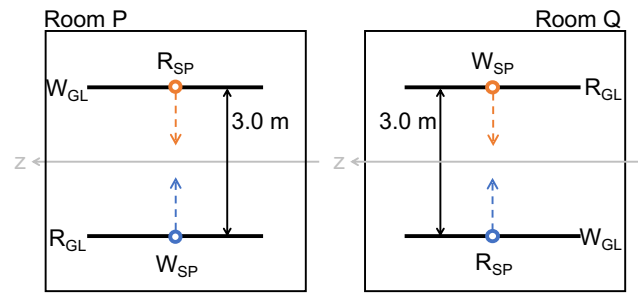


図 7 すれ違いタスク

Fig. 7 Passing each other task

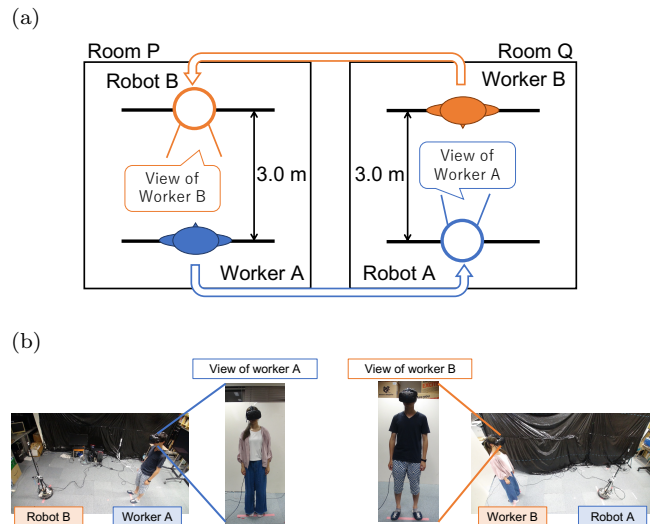


図 8 遠隔ビデオ条件：(a) は模式図、(b) はそれぞれの作業者が見る視界

Fig. 8 The remote video condition: (a) shows an overview. (b) shows the view of each worker.

に没入するロボット条件を設定した。

遠隔ビデオ条件ではこれまで述べてきた通り、遠隔 2 地点の両方で HMD を装着した作業者がおり、それぞれの HMD に遠隔地のロボットに設置されたカメラの映像が表示される (図 8)。またロボット条件では、Worker B のみが遠隔作業空間からロボットに没入し、Worker A の HMD にはビデオスルーにより目の前の様子がそのまま表示される。これにより、ロボット条件では従来の、双方向ではない片方向テレプレゼンスロボットを利用した協調作業を行う。なおロボット条件では、Worker A と位置同期する Robot A は使用しない (図 9)。

いずれの条件においても、作業者同士による動作の視覚的な情報伝達を検討するために、作業者に対して会話することを禁止した。そのため実験中、作業者は相手の姿など視覚的な情報のみを参考に行動した。

5.3 実験参加者

実験には大学院生 12 名 (全員男性) からなる 6 ペアが参加した。この 12 人のうち、HMD を用いた VR 環境をこ

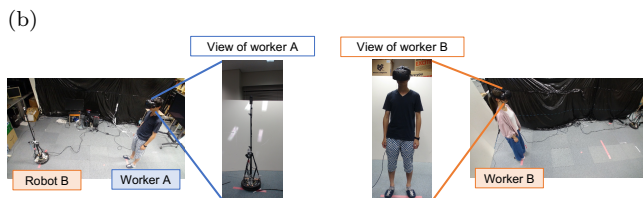
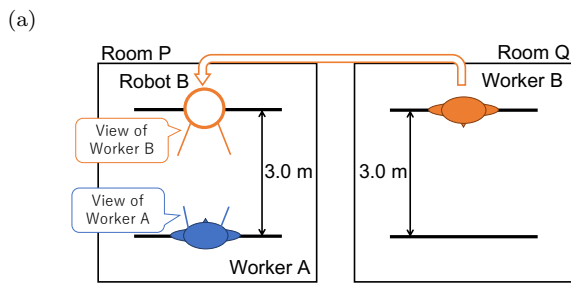


図9 ロボット条件：(a)は模式図，(b)はそれぞれの作業者が見る視界

Fig. 9 The robot condition: (a) shows an overview. (b) shows the view of each worker.

の実験で初めて使う人は5人いた。また6ペアのうち、1ペアのみが互いに初対面であった。

5.4 実験手続き

実験は参加者内計画で行った。各ペアはそれぞれ遠隔ビデオ条件とロボット条件のどちらかから先に実施する。順序効果を相殺するために、条件ごとに行うペア数は一致させた。まず各条件で実験参加者はWorker AとBに割り当てられ、それぞれ遠隔作業空間であるRoom PとQに移動する。その後、実験者よりシステムの説明を受けたあと、参加者がテレプレゼンスロボットを用いたすれ違いタスクに慣れるために、すれ違いタスクを2回練習として実施した。実験者は両方の参加者がタスクを理解するまで、ゴールラインの配置や作業空間内をどこまで移動できるかなど説明した。

その後、本番となるタスクを1回実施する。本番タスクを実施後、条件を変えて一連の流れを繰り返し実施する。ただしロボット条件は遠隔ビデオ条件とは異なり、参加者間で非対称の実験であるため、一度本番タスクを終えたあと、Worker AとBの役割を変えて再度、練習と本番タスクを実施した。そのため実験タスクは、遠隔ビデオ条件で合計6回（各ペア1回ずつ）、ロボット条件では合計12回（各ペア2回ずつ）実施した。

また2条件の実験を終了後に、実験者による非構造化インタビューを実施し、タスクやシステムへの印象などを自由に回答させた。

5.5 データの取得

作業者が装着したHMDおよび移動ロボットに搭載されたコントローラにより、作業およびロボットの座標情報

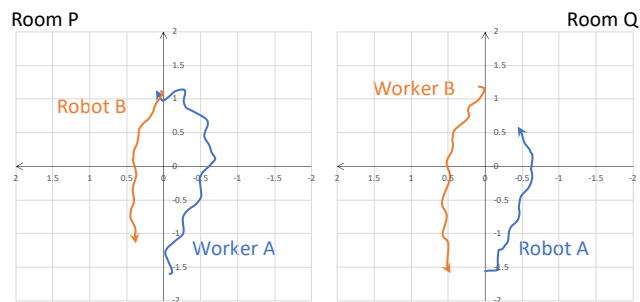


図10 実験タスク中の作業員およびロボットの移動の軌跡 (Pair 1: 遠隔ビデオ条件)

Fig. 10 Trajectories of the workers and robots. (Pair 1: Remote video condition)

を取得した。取得した座標情報は、遠隔ビデオ条件で6組2地点の、のべ作業員12人とロボット12台分、ロボット条件では作業員とロボットが両方いるRoom A側のみの6組1地点で、各組2回の本番タスクを行ったため、のべ作業員12人とロボット12台分である。取得の頻度は座標情報がHMDと処理用PC間でやりとりされる頻度と同じ、1秒間につき5回(0.2秒ごと)である。これらのデータから、作業員およびロボットの、実験中の移動の様子を観察した。

また、作業員に提示される情報によってどのように協調作業を行うか検討するために、実験中にHMDが作業員に提示していた映像を取得した。この映像から、作業中の作業員の視野を取得でき、双方向テレプレゼンスロボットが提示する情報がどのように使われるか検討することができる。HMDの映像は本番タスクのときのみ取得し、遠隔ビデオ条件で6組2地点の12本、ロボット条件で6組1地点各2回の本番タスクの分合わせて12本、両条件で計24本取得した。

加えて、主観評価のためのインタビューの記録を得た。

6. 結果

6.1 作業員の移動の様子

実験タスク中の作業員およびロボットの移動の軌跡の一例を図10に示す。この図は各作業員がゴールラインに到達するまでの軌跡であるが、Robot A, Bともに、Worker A, Bと同期して動いている様子が見て取れる。また、実験タスク中における作業員の歩行時間、歩行距離、歩行速度、ロボットの移動距離、移動速度の平均値を表1に示す(すべてN=12)。いずれにも条件間で平均値に差があるか検定するためにpaired t-testを行ったが、有意差は認められなかった。

また、実験タスクをスタートしてから作業員がロボットとすれ違うまでの時間を合わせて計測した。図4に示すように進行方向と同じ向きに定義されたx軸について、作業員とロボットのx座標値の大小が逆転したときにすれ

表 1 作業者とロボットの移動, t 値, p 値は paired t-test によるもの

Table 1 Movement of workers and robots. T- and p-values are the results of paired t-tests.

	遠隔ビデオ条件	ロボット条件	t 値	p 値
歩行時間 (s)	12.28 (SD : 3.05)	11.67 (SD : 3.61)	0.64	0.54
作業者の歩行距離 (m)	3.64 (SD : 0.29)	3.67 (SD : 0.38)	-0.23	0.82
作業者の歩行速度 (cm/s)	31.2 (SD : 6.96)	33.7 (SD : 8.19)	-0.84	0.42
ロボットの移動距離 (m)	2.94 (SD : 0.58)	2.73 (SD : 0.78)	0.91	0.38
ロボットの移動速度 (cm/s)	24.3 (SD : 2.72)	24.4 (SD : 3.50)	0.43	0.68

表 2 画面中央に着目した顔を向きの定義

Table 2 Definition of the face direction focused on the center of the HMD's display

顔の向き	遠隔ビデオ条件	ロボット条件
上半身	相手の腰より上	ロボットの中央より上
下半身	相手の腰以下, かつ床より上	ロボットの中央以下, かつ床より上
床面	床	床

違いが起こったとみなした。各作業者がスタートしてからロボットとすれ違うまでの平均値は、遠隔ビデオ条件で 7.40 秒 (SD : 1.49 秒), ロボット条件で 7.32 秒 (SD : 2.96 秒) で, paired t-test の結果, 有意差は認められなかった ($t(11) = 0.11, p = .91$)。

6.2 すれ違いタスク中の作業者の視野

実験中に録画された, 作業者が見ていた HMD の映像の例を図 11 に示す。この映像中の画面中央 (図 11 中の赤点) に着目したとき, その画面中央が表 2 に示す位置にあったとき, それぞれ上半身, 下半身, 床面を見ている, と判断し, その時間を計測し, 全ペアの平均値を算出した (表 3)。計測は作業者とロボットがスタートしてからすれ違うまで行った。

繰り返しのある二元配置分散分析の結果, 条件間の差 ($p < .01$) および交互作用 ($p < .01$) に有意差が認められた。また, 上半身, 下半身, 床面の各箇所を向いていた時間について, 事後検定として Bonferroni 法による補正をかけて paired t-test を行った結果, 条件間で上半身を向いていた時間 ($t(11) = 5.73, p < .01$), 下半身を向いていた時間 ($t(11) = -3.65, p < .05$), 床面を向いていた時間 ($t(11) = -2.99, p < .05$) いずれにも有意差が認められた。

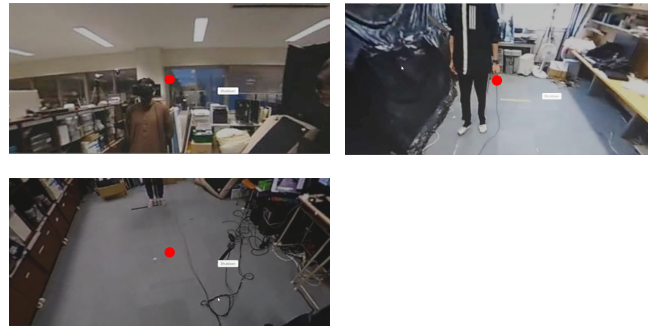


図 11 HMD の映像と顔の向きの決定: 左上は上半身, 右上は下半身, 左下は床面を向いている様子

Fig. 11 Screenshots displayed to workers: Upper left shows the worker looked at the partner's upper body. Upper right shows the worker looked at his/her lower body. Below left shows the worker looked at the floor.

表 3 視野の向きと時間

Table 3 Time viewing body parts

		上半身	下半身	床面
遠隔ビデオ条件	平均値	6.88	0.38	0.00
	標準偏差	2.01	1.27	0.00
ロボット条件	平均値	1.40	3.25	2.65
	標準偏差	2.24	2.40	2.94

7. 検討

遠隔ビデオ条件とロボット条件では, 作業者の作業中の顔の向きに大きな違いが見られた。遠隔ビデオ条件では主に作業相手の上半身を見る時間が相対的に長く, ロボット条件では下半身や床面を見る時間が長かった。この結果に関連する内容として, インタビューの結果を合わせて検討する。

インタビューでは, 「ロボットの進行方向が分からない (P2)」、「人間を見る場合にロボットの進路予測ができた (P3)」、「人間を見てその移動方向がはっきりと分かった (P5)」、「ロボットの進行方向が分からない (P7)」、「ロボットの進行方向には迷った (P8)」といったコメントがあった。いずれも, HMD を通して相手の作業者の姿が見える遠隔ビデオ条件では相手の進行方向が予測でき, HMD を通してロボットの姿が見えるロボット条件ではロボットの進行方向が予測できない, というものであった。

以上の内容を踏まえると, 作業者は遠隔ビデオ条件の際, 相手の上半身を見ることで相手の次に進むであろう方向, すなわち次の動作を予測している可能性がうかがえる。一方ロボット条件では, 上半身を見てもロボットの行動を予測できないため, ロボットの可動部である下半身を見ている可能性があるが, インタビューのコメントから, 作業相手がロボットの場合, 遠隔地にいる作業者の姿を見るよりも行動予測がしにくいことが分かる。つまり, 遠隔地間で移動を伴う協調作業を行う場合, 相手の動作を予測するた

めに作業相手の上半身の姿を提示することが重要であることを示唆する。

また作業者の視野の様子から、双方向テレプレゼンスロボットは作業相手の行動予測だけではなく、視野が下を向くことによって周囲の様子を確認できなくなることを防ぐことができると考える。そのため例えば周囲を見渡しながら別のタスクを行うなど、他のタスクを同時にこなすことを双方向テレプレゼンスロボット環境ではより容易に行える可能性がある。

8. 結論

本研究では演劇やスポーツ、ダンスなどの、空間の移動を含む協調作業について検討した。空間移動を含む協調作業では相手の行動を知るために、互いの位置関係や相手の動作の様子を把握することが必要である。遠隔環境下でもこれらの情報を共有するために、本研究では従来提案された双方向テレプレゼンスロボット [1] を用いたシステムを使い、遠隔協調作業における作業者の行動の様子を観察した。その上で、双方向テレプレゼンスロボットが作業者に提供する情報の効果を検討した。

空間移動を伴う協調作業の一例として、二者が歩み寄ってすれ違うタスクについて検討した。実験では、本研究で扱う双方向テレプレゼンスロボットと、従来の、一方の作業者のみが没入する片方向のテレプレゼンスロボットの比較を行った。

その結果、作業者の顔の向きが双方向テレプレゼンスロボットを用いたシステムにおいて、より相手の作業者の上半身を向いていることが確認できた。インタビューの結果と照らし合わせると、遠隔環境下における協調作業を支援するために、相手の上半身を提示することは相手の次の動作を予測することに利用される可能性が示唆された。双方向テレプレゼンスロボットは、ロボットに360度カメラを取り付けるという比較的安易な実装で実現できるため、双方向に情報を提示することは、今後テレプレゼンスロボットを用いたシステムを開発していく上での重要な設計指針になると考える。

謝辞 本研究の実施には野口康人氏の協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参考文献

[1] Inoue, T. and Yuan, Z.: Remote Video Figure Achieves Smooth Cooperative Movement in a Bidirectional Telepresence Robot Environment, *Collaboration and Technology* (Rodrigues, A., Fonseca, B. and Prego, N., eds.), Cham, Springer International Publishing, pp. 91–104 (2018).

[2] Jones, A., Lang, M., Fyffe, G., Yu, X., Busch, J., McDowall, I., Bolas, M. and Debevec, P.: Achieving Eye Contact in a One-to-Many 3D Video Teleconferencing System, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 3 (online),

DOI: 10.1145/1531326.1531370 (2009).

[3] Tang, J. C. and Minneman, S.: VideoWhiteboard: Video Shadows to Support Remote Collaboration, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '91, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 315–322 (online), DOI: 10.1145/108844.108932 (1991).

[4] Handberg, L., Gullström, C., Kort, J. and Nyström, J.: Spatial and Social Connectedness in Web-Based Work Collaboration, *Proceedings of the 19th ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing Companion*, CSCW '16 Companion, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 45–48 (online), DOI: 10.1145/2818052.2874321 (2016).

[5] Inoue, T., Nawahdah, M. and Noguchi, Y.: User's Communication Behavior in a Pseudo Same-room Videoconferencing System BHS, *International Journal of Informatics Society (IJIS)*, Vol. 6, pp. 39–47 (2014).

[6] Hirata, K., Harada, Y., Takada, T., Aoyagi, S., Shirai, Y., Yamashita, N., Kaji, K., Yamato, J. and Nakazawa, K.: t-Room: Next Generation Video Communication System, *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1–4 (online), DOI: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.1058 (2008).

[7] Pejisa, T., Kantor, J., Benko, H., Ofek, E. and Wilson, A.: Room2Room: Enabling Life-Size Telepresence in a Projected Augmented Reality Environment, *Proceedings of the 19th ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work & Social Computing*, CSCW '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1716–1725 (online), DOI: 10.1145/2818048.2819965 (2016).

[8] 阿久津明人, 日高浩太, 井上雅之, 伊藤直己, 山口徹也, 藤村 滋, 中平 篤: 競技の感動を世界中で共有できるサービスに向けた技術開発, *NTT 技術ジャーナル*, pp. 10–14 (2015).

[9] Maimone, A., Yang, X., Dierk, N., State, A., Dou, M. and Fuchs, H.: General-purpose telepresence with head-worn optical see-through displays and projector-based lighting, *2013 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 23–26 (online), DOI: 10.1109/VR.2013.6549352 (2013).

[10] Fuchs, H., State, A. and Bazin, J.: Immersive 3D Telepresence, *Computer*, Vol. 47, No. 7, pp. 46–52 (online), DOI: 10.1109/MC.2014.185 (2014).

[11] You, B.-J., Kwon, J. R., Nam, S.-H., Lee, J.-J., Lee, K.-K. and Yeom, K.: Coexistent Space: Toward Seamless Integration of Real, Virtual, and Remote Worlds for 4D+ Interpersonal Interaction and Collaboration, *SIGGRAPH Asia 2014 Autonomous Virtual Humans and Social Robot for Telepresence*, SA '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/2668956.2668957 (2014).

[12] Orts-Escolano, S., Rhemann, C., Fanello, S., Chang, W., Kowdle, A., Degtyarev, Y., Kim, D., Davidson, P. L., Khamis, S., Dou, M. and et al.: Holoportation: Virtual 3D Teleportation in Real-Time, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 741–754 (online), DOI: 10.1145/2984511.2984517 (2016).

[13] Komiyama, R., Miyaki, T. and Rekimoto, J.: JackIn Space: Designing a Seamless Transition between First and Third Person View for Effective Telepresence Collaborations, *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, AH '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI:

- 10.1145/3041164.3041183 (2017).
- [14] Lee, G. A., Teo, T., Kim, S. and Billinghurst, M.: Mixed Reality Collaboration through Sharing a Live Panorama, *SIGGRAPH Asia 2017 Mobile Graphics & Interactive Applications*, SA '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3132787.3139203 (2017).
- [15] Piumsomboon, T., Day, A., Ens, B., Lee, Y., Lee, G. and Billinghurst, M.: Exploring Enhancements for Remote Mixed Reality Collaboration, *SIGGRAPH Asia 2017 Mobile Graphics & Interactive Applications*, SA '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3132787.3139200 (2017).
- [16] Piumsomboon, T., Lee, G. A., Hart, J. D., Ens, B., Lindeman, R. W., Thomas, B. H. and Billinghurst, M.: Mini-Me: An Adaptive Avatar for Mixed Reality Remote Collaboration, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3173574.3173620 (2018).
- [17] Teo, T., F. Hayati, A., A. Lee, G., Billinghurst, M. and Adcock, M.: A Technique for Mixed Reality Remote Collaboration Using 360 Panoramas in 3D Reconstructed Scenes, *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3359996.3364238 (2019).
- [18] Adalgeirsson, S. O. and Breazeal, C.: MeBot: A robotic platform for socially embodied telepresence, *2010 5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 15–22 (online), DOI: 10.1109/HRI.2010.5453272 (2010).
- [19] Kawanobe, H., Aosaki, Y., Kuzuoka, H. and Suzuki, Y.: iRIS: A remote surrogate for mutual reference, *2013 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 403–403 (online), DOI: 10.1109/HRI.2013.6483618 (2013).
- [20] Tachi, S.: Telexistence: Enabling Humans to Be Virtually Ubiquitous, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 36, No. 1, pp. 8–14 (online), DOI: 10.1109/MCG.2016.6 (2016).
- [21] Tachi, S., Watanabe, K., Takeshita, K., Minamizawa, K., Yoshida, T. and Sato, K.: Mutual telexistence surrogate system: TELESAR4 - telexistence in real environments using autostereoscopic immersive display -, *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 157–162 (online), DOI: 10.1109/IROS.2011.6094543 (2011).
- [22] Nakanishi, H., Tanaka, K. and Wada, Y.: Remote Handshaking: Touch Enhances Video-Mediated Social Telepresence, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 2143–2152 (online), DOI: 10.1145/2556288.2557169 (2014).
- [23] Nagendran, A., Steed, A., Kelly, B. and Pan, Y.: Symmetric Telepresence Using Robotic Humanoid Surrogates, *Comput. Animat. Virtual Worlds*, Vol. 26, No. 3–4, p. 271–280 (online), DOI: 10.1002/cav.1638 (2015).
- [24] Kayukawa, S., Higuchi, K., Guerreiro, J. a., Morishima, S., Sato, Y., Kitani, K. and Asakawa, C.: BBEEP: A Sonic Collision Avoidance System for Blind Travellers and Nearby Pedestrians, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3290605.3300282 (2019).
- [25] 清川 清: 広画角高精細ディスプレイにおける最近1年の技術動向, 技術報告, 光産業技術振興協会 (2002).