Vol.2017-GN-101 No.29
2017/3/11

遠隔 2 地点の相互サロゲートによる空間的な協調作業の支援

片山直樹[†1]　高津良介[†1]　井上智雄[†2]　重野寛[†3]

概要：協調作業の遠隔化を支援する研究が行われているが，他の作業者の身体動作などのノンバーバル情報及び位置や向きなどの空間的な情報をお互いに把握する必要がある空間的な協調作業を遠隔環境で行うことは依然として困難なのが現状である．そこで，本研究では双方向のサロゲートによる空間的な遠隔協調作業の支援を提案する．遠隔地に自身の動きに合わせて移動するロボットを用意し，これに取り付けたカメラから遠隔地の一人称視点実映像を見ながら作業を行う．この状態を双方向にすることで，お互いが相手との空間的位置関係を把握しながらノンバーバルな情報を共有することができる．評価実験の結果，提案システムは遠隔 2 地点における 2 名での空間的な協調作業において，実映像によるノンバーバル情報の共有と位置関係把握の双方を両立した遠隔作業支援の実現を確認した．

キーワード：サロゲート，双方向，身体的協調作業，空間的協調作業，遠隔協調作業

Support of Spatial Collaborative Work by Mutual Surrogates at Two Remote Sites

NAOKI KATAYAMA[†1]　RYOSUKE TAKATSU[†1]
TOMOO INOUE[†2]　HIROSHI SHIGENO[†3]

Abstract: Research is being conducted to support remoteness of cooperative work, but spatial cooperative work that needs to grasp non-verbal information such as body motion of other workers and spatial information such as position and orientation, etc. It is still difficult to do in a remote environment.　Therefore, in this research, we propose supporting spatially remote cooperative work by mutual surrogate. We prepare a robot that moves according to the movement of himself to a remote place and work while looking at the first person's real picture at a remote place from the camera attached to it. By making this state bidirectional, it is possible for each other to share non-verbal information while grasping the spatial positional relationship with the opponent. As a result of the evaluation experiments, the proposed system confirmed the realization of remote work support that balances both non-verbal information sharing and realization of positional relationship by real video in spatially coordinated work at remote two sites.

Keywords: surrogate, mutual, collaborative work, spatial collaborative work, remote collaborative work

1. はじめに

今日，我々は様々な協調作業を行いながら生活をしている．最も単純な協調作業である会話から会議，スポーツ，演劇，ダンス，演奏活動など，その種類は多岐に渡る．これらの協調作業をシステムが介入することにより支援する研究が行われてきた．その中で，協調作業を遠隔化し，本来なら対面環境でなければ行えない作業を，作業者が離れた場所にいても行えるようにする研究がある．これらの研究では，作業を遠隔化することで，空間的な制約を取り除き，本来ならば共に作業が行えない遠方の作業者と作業を共有することが可能となる．

研究の発展に伴い，会議や会話といった移動を必要としない協調作業の遠隔化に関しては，様々な手法を用いて，遠方にいながら対面時に近い環境で協調作業を行うことが可能になってきている．これに対して，演劇活動やダンスなど，ステージのような一定の広さを持つ空間内を移動しながら行う協調作業の遠隔化は，これまでの手法を用いて遠隔化することが難しい．これらの協調作業では，相手との位置関係や動作に合わせながら自身の行動を決定し，実行する．そのため，これらの協調作業の遠隔化には，作業者が，相手の動きや姿勢などのノンバーバルな情報や作業者との相対的な位置関係といった空間的な位置情報を取得すると同時に，作業者自身のノンバーバルな情報や位置情報を相手にも伝える必要がある．このように各作業者が空間的な位置情報及び細かな動作などのノンバーバルな情報を共有する必要がある作業を「空間的な協調作業」と定義し，本研究では空間的な協調作業の遠隔化の実現を目指す．

空間的な協調作業を遠隔化するためには，空間的な位置情報及び細かな動作などのノンバーバルな情報の両方を相互に共有可能な環境が必要である．そこで，遠隔 2 地点に

†1 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University
†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
†3 慶應義塾大学理工学情報工学科
Department of Computer and Information Science, Faculty of Science and Technology, Keio University

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

おいて，作業者が互いに相手の作業空間に没入するシステムを提案する．作業者は HMD を装着し，自身の動きに合わせて動くロボットに取り付けたカメラから送られてくる遠隔地の一人称視点実映像を見る．これを相互に行うことで，自身に合わせた位置からの一人称視点で相手との位置関係を把握しつつ，実写で遠隔地にいる作業者のノンバーバルな情報も互いに確認できる．

本稿の構成は本章以降，2 章では協調作業の遠隔化とその課題を説明し，3 章では本研究の提案，4 章ではその実装，5 章では評価実験について述べ，最後に 6 章で結論を述べて結びとする．

2. 協調作業の遠隔化

近年，要素技術の発達により，様々な作業が遠隔環境で行えるようになった．遠隔会議のような単純な作業だけでなく，会話以上の行動が必要な複雑なコミュニケーションなども遠隔化されてきている．本章では，様々な協調作業の遠隔化について，その手法毎に分類し，それぞれの利点と欠点に触れながら，最後に空間的な協調作業の遠隔化の課題について述べる．

2.1 平面ディスプレイを用いた遠隔作業支援

平面ディスプレイを用いて遠隔地の相手とコミュニケーションをとる場合，相手の表情を確認するディスプレイ部分と，表情を撮影するカメラが分離しているため，相手と目を合わせたり,方向を共有したりすることが困難である．この課題を解決するために Jones らはユーザの視線をトラッキングし，ユーザの向いている方向をリアルタイムで映像に反映させるシステムを開発した[1]．また，遠隔地と自身のいる空間は異なるため，互いの背景の違いから共在感を感じにくいという課題に着目し，背景をグリーンバックにし，背景映像を共通のものにすることで同じ空間にいるよう演出する Web コミュニケーションツールも存在する[2]．上記の研究では背景に CG を合成しているが，この背景部分に自身のいる部屋に存在するディスプレイの向こう側の映像を貼り付けることで遠隔地のユーザが自分と同じ部屋にいるように見せる遠隔コミュニケーションシステムも存在する[3]．

平面ディスプレイを用いた遠隔協調作業支援は，実映像を用いることで，遠隔地にいる相手の表情や仕草などのノンバーバルな情報を共有することができるため，コミュニケーションを目的として使用されることが多い．しかし，平面ディスプレイに映る映像だけでは，相手との空間的な位置関係を把握することは困難である．また，平面ディスプレイは映像を見ることができる方向が限定されてしまうため，移動のある協調作業には不向きである．

2.2 仮想空間を用いた遠隔作業支援

仮想空間の作成，体感する技術の発達に伴い，様々な用途で仮想空間が用いられるようになった．用途に合わせて自由に環境を構築し,自身のアバタを操作することができ，仮想空間内で遠隔地の相手とコミュニケーションをとることが可能であるため，仮想空間を用いた遠隔環境はゲームなどの用途に応用されることが多い．例として，仮想空間上で遠隔地のプレイヤーと卓球ゲームができるシステムなどが挙げられる[4]．また近年では，MMORPG などのように大人数がネット上の仮想空間に集まってコミュニケーションをとったり，共通の目的のもと作業を行ったりする環境も実用化されている．そのため，オンラインゲームに応用されるほか，自閉症患者のコミュニケーション能力向上の機会として扱う研究[5]なども存在し，その応用は多岐にわたる．

アバタを通して遠隔地の相手と同じ仮想空間に没入することが可能であるため，空間的な位置関係の共有は可能であるが，アバタの再現する身体動作や表情などのノンバーバルな情報は限定的であり，細かな情報を伝えることはできない．そのため，相手の細かな動作に合わせて行動する協調作業には不向きである．

2.3 プロジェクションマッピングによる遠隔作業支援

プロジェクタの小型化・高性能化に加え，平面ではない特定の物体に対するプロジェクションマッピングの技術が発展し,様々な場面に応用されている.遠隔協調作業では，室内のソファに遠隔地のユーザのリアルタイム映像をプロジェクションし，遠隔地のユーザが目の前に座っているように見える状態でコミュニケーションを行うことができるシステム[6]が存在する．他にも，実際にはその場にいない演者を，プロジェクションマッピングを用いて立体的に投影し，現地の演者がそれに合わせてパフォーマンスを行うことで，これを観る観客には実際に遠隔地のパフォーマーが舞台にいるように見える技術も開発されている[7]．

プロジェクションマッピングによって実映像を遠隔地の相手に見せることができるため，高精細なノンバーバル情報の共有が可能である一方，特定の位置でしかプロジェクションの映像を立体的に見ることができないため，空間的な位置関係を複数人で共有することは困難である．

2.4 サロゲートロボットを用いた遠隔作業支援

ロボット技術は急速に進歩しており，人間に近い作業を行うことも可能になってきた．ロボットの目の部分にカメラを，耳の部分にマイクを付け，一人称的な視覚，聴覚を提示することによって，操作者がロボットの場所に没入しているような感覚を得ることも可能になってきている[8]．このようなサロゲートロボットを用いて遠隔協調作業を支援する研究も多い．例として，2 つの地点にロボットを用意し，ユーザの動きを双方向で遠隔地のロボットに反映させることで，遠隔 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研究が挙げられる[9]．

サロゲートロボットを用いることで，作業者同士の位置関係を把握しながら遠隔作業を行えるだけでなく，ロボッ

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

トの機能次第では物理的な作業も行うことができる．しかし,遠隔地の相手から見た自身の姿はロボットであるため，アバタと同様に身体的な細かい動作を遠隔地で共有することができない．

2.5 空間的協調作業の遠隔化に対する課題

各手法による遠隔作業支援の利点と欠点をまとめると，平面ディスプレイ及びプロジェクションマッピングを用いた遠隔作業支援は，実映像ベースの情報共有により表情や仕草などの高精細なノンバーバル情報が共有できるが，空間的な位置関係の把握が困難であり，移動を伴った作業には不向きである．一方，仮想空間やサロゲートロボットによる遠隔作業支援では， 空間的な位置関係を把握し，位置に応じた協調作業が可能であるが，共有できるノンバーバルな情報はロボットやアバタの再現できる動作に限定される．空間的位置関係の共有及び細かな動作などのノンバーバルな情報の共有をそれぞれ考慮しているならば○，していないならば×とし,これを表にすると表 1 のようになる．スポーツのセットプレイ練習や演劇，ダンスなどのステージパフォーマンスといった空間的な協調作業を遠隔化する場合，空間的な位置関係を把握し，相手との距離感や位置に応じた作業や動作を行える必要がある．これと同時に，協調作業を遠隔化するためには相手の細かな動作，姿勢などのノンバーバルな情報を用いたコミュニケーションが取れる必要がある．そこで，本研究では，上記の両立を実現し，位置関係及び高精細な身体動作の共有が必要な空間的な協調作業の遠隔化の実現を目指す．

表 1　既存手法の共有可能情報の対応表

	空間的位置関係	身体動作情報
平面ディスプレイ	×	○
仮想空間	○	×
プロジェクション	×	○
サロゲートロボット	○	×

3. 遠隔 2 地点における相互サロゲートによる空間的な協調作業の支援

3.1 空間的な協調作業の遠隔化におけるリクアイアメント

空間的な協調作業を遠隔化するには，空間的な位置関係の共有と高精細な身体動作の共有の両立を双方向で実現することが重要である．上記の両立を実現するために，どのような手法が適しているかを既存研究の分析から考える．

現在の技術では，作業者の詳細な身体動作を遠隔地に伝達する方法として，実映像を用いることが良いと考えられる．年々CG 技術も向上しているが，細かい仕草などは生身の人間の実映像と比較すると情報のロスがある．スポーツや演劇といった空間的な協調作業では，細かな動作，身体の動きを共有する必要があるため，空間的な協調作業の遠隔化には，実映像の使用が適している．また，実映像で相手の姿を提示する際，その視点は対面時と同様の一人称視点を提示する．これによって遠隔地の相手と対面で作業を行っているかのように作業が行える．

一人称の実映像を用いて空間的な位置関係の共有を行うためには，作業者が空間内を移動するのに合わせて視点を変化させる必要がある．作業者の動きに合わせて視点が変化することで，遠隔地へサロゲートし，空間内を移動しても対面時と同様に相手との距離感を把握し，位置関係を意識しながら作業することが可能である．また，作業者の移動に合わせて視点が変化するので，遠隔地への没入感が高まり，相手と同一の空間で作業しているように感じることができる．

この実映像を用いたサロゲートを片方向で行うだけでは,サロゲートロボットと同様に，一方では位置関係や相手の身体動作を確認しながら作業を行うことができるが，一方では相手の身体動作を確認することができない．空間的な協調作業を遠隔化するためには，遠隔地にいる各作業者がお互いの身体動作や位置関係の情報を把握，共有する必要がある．そのため，遠隔の両地点において環境が同一であり，あらゆる情報が双方向に通信されている環境を構築することが重要であると言える．

3.2 遠隔 2 地点の相互サロゲートシステム

本稿では，遠隔 2 地点の作業者が相手のいる遠隔地に相互に没入する環境を提案する．遠隔環境において同じ大きさ，形の作業空間をそれぞれ用意し，作業者は実空間の遠隔地に没入し，実映像で遠隔地の作業者を視認する．提示される実映像を作業者の位置及び頭の向きに合わせて遠隔地を移動することにより，作業者は遠隔地を一人称視点で確認することができる．この環境を 2 地点間で双方向に用意することで，どちらの作業者も「目の前に遠隔地の作業者がいる空間」を体感することができる．また，双方向でサロゲートを行うことにより，作業者が実際にいる空間を認識することができないため，作業者自身の動きに合わせて遠隔地での一人称視点さえ提示できれば，その提示方法に制限はないため，様々なアプローチによって提案環境を用意することが可能である．

これらのことから，提案手法によって，遠隔地にいる相手と空間的な位置関係を一人称視点で把握しながら自身の身体動作などの高精細な情報を相手に伝えられることが期待できる．

4. 相互サロゲートシステムの実装

4.1 システム構成

今回実装した提案システムの構成を図 1 に示す．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 を装着した作業者を配置する．図では位置マーカとしてコントローラを用いている．加えて，地点間の位置合

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

わせを行うため，各地点の所定の位置に位置マーカを設置する．各地点には作業空間の対角線上に 2 つずつトラッキングカメラを設置する．このトラッキングカメラで HMD と位置マーカの位置と向きをリアルタイムに取得している．このカメラで取得したそれぞれの位置及び向きの情報は各地に設置した処理用 PC で処理された後，遠隔地の PC と通信を行う．PC は通信により取得した遠隔地の作業者の位置及び頭の向きに合わせてロボットの位置と向きを合わせるようにロボットを移動させる．

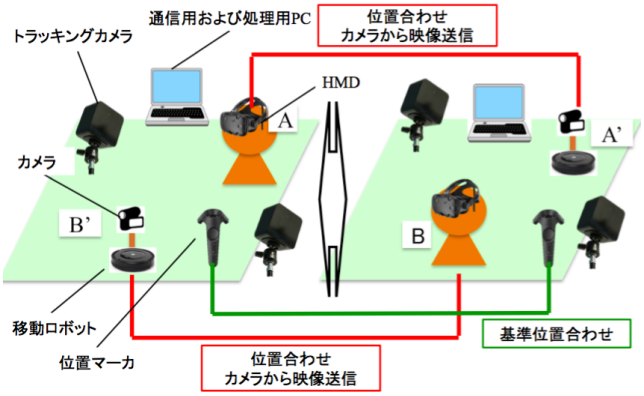

図 1　システム構成図

使用した機材としては，作業者が装着する HMD 及び位置マーカとしてのコントローラ 2 つ，トラッキングカメラ 2 つは HTC 社の VIVE を用いた．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り，この上に高さの調節が可能なスタンドを立て，スタンドの先端には一人称視点実映像撮影用カメラとして，スマートフォンを取り付けた．VIVE のトラッキングカメラは，2 つのカメラの間の直線距離が 5m 以内であれば正常に機能する.そのため，今回のハードウェア環境においては，作業空間の最大範囲は対角線を 5m とする正方形または長方形の空間となる．

4.2 作業者とロボットの位置及び向きの取得

本システムでは，作業者とロボットの位置及び向きは，同作業空間内に設置した位置合わせ用のコントローラとの相対的な位置関係で取得している．すなわち，図 2 のように，作業者の装着する HMD とロボットに取り付けたコントローラの位置，向きの座標から，位置合わせ用のコントローラの座標を引いた値をそれぞれの座標として PC が認識するようにした．このようにすることで，遠隔 2 地点間でトラッキングカメラなどの配置が異なっても，位置合わせ用のコントローラの位置と向きを合わせるだけで，空間内の座標環境を一致させることができる．

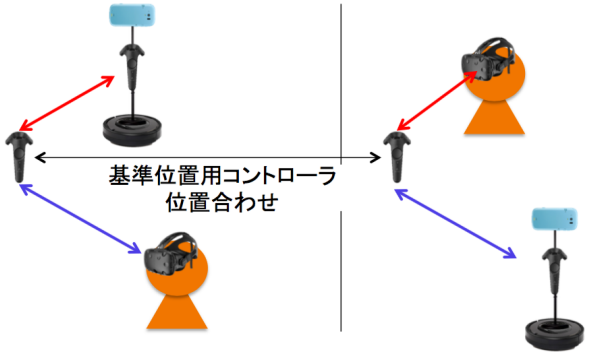

図 2　基準コントローラからの相対的な位置・向き取得

4.3 通信とロボットの同期移動

ロボットの位置は常に遠隔地の作業者の位置，向きに合わせて動く．今回移動ロボットとして用いた iRobot Create 2 は，左右への回転と前進移動，後退移動が行える．プログラミングにより，−500mm/s〜500mm/s の任意の回転速度を右の車輪，左の車輪それぞれに設定することができる．今回の実装では，カメラの揺れなどを考慮してロボットの速度は 150mm/s とした．

今回，2 地点それぞれに配置した処理用 PC は，一方の PC をサーバ，もう一方の PC をクライアントとした Socket 通信を用いて 0.2 秒に 1 回位置情報を送り合う．位置や向きの情報を受け取ると，ロボットと作業者の向きのずれと位置のずれの大きさに応じて処理を切り替えている．アルゴリズムは，以下のようになっている．なお，ここでの「位置のずれ」は 作業空間平面の縦軸のずれと 横軸のずれの大きさの合計とする．

(1)　位置のずれが 30cm 以上になった場合，ロボットはずれの値を小さくする方向に前進または後退をする．
(2)　位置のずれが 30cm 以内であり，向きのずれが 0.1 ラジアン以上の場合，ロボットはずれの値を小さくする方向に回転する（図 3）．
(3)　位置のずれが 30cm 以内，かつ向きのずれが 0.1 ラジアン以内であれば，ロボットは静止する．

上記を 0.2 秒に 1 回の頻度で確認し，ロボットの位置及び向きを遠隔地の作業者の頭の位置，向きに合わせて移動させる．

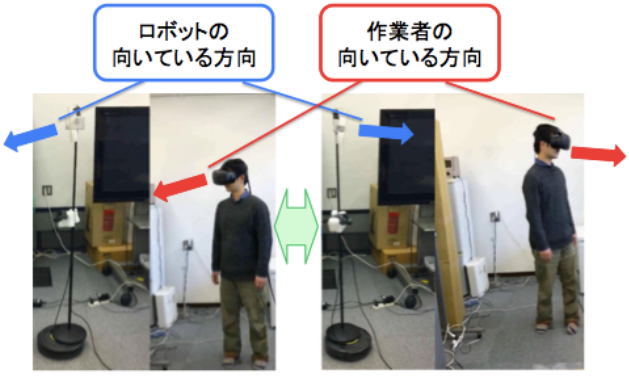

図 3　作業者の向きに合わせてロボットの向き変更

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

4.4 作業者への提示映像

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されるロボットに設置したカメラからの一人称視点実映像である．実際にシステムを用いて 2 地点間でコミュニケーションをとっている様子は図 4 のようになる.このように，それぞれの地点においては作業者の目の前にロボットが存在するが，双方向に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，作業者にはロボットは視認されない．映像はロボットに取り付けたカメラから直接処理用 PC に転送している．具体的には，Skype を使用し，撮影用スマートフォンから PC に繋ぎ，ビデオ通話により映像を送信し，HMD でこれを表示している．ラグについては通信環境に依存するが，正常に映像が映し出されている状態を安定して保てるだけの通信環境があれば，コミュニケーションに影響を与えるようなラグは発生しないことを確認した．

図 4　システムを使用している図

5. 評価実験

本システムが作業者に対して空間的な位置関係の把握をどの程度実現しているかについて，空間的な位置関係を把握する上で代表的な視点である俯瞰視点を見ながら作業を行った場合と比較して評価を行った．被験者は，大学生，大学院生 24 名を，2 名 1 組とした 12 組であった．遠隔 2 地点間で，2 名の位置関係が重要となるタスクを用意し，精度を計測した．加えて，実験の後にシステムの使用感を問うアンケートを実施した．

5.1 比較環境

比較環境としては，被験者の装着する HMD に提示する映像の視点を以下の 3 つに設定し，それぞれにおいて同じ内容のタスクを行ってもらった上で比較した．俯瞰視点は様々な分野で位置関係を把握する上で多く使用される視点である．この俯瞰視点と比較を行うことで，現状における位置関係把握を支援する手法と同程度の支援ができるかどうかを評価した．

- 自身に合わせて移動するロボットからの一人称視点（提案手法）（図 5 の左）
- 自身に合わせて移動するロボットの背後からの，作業空間を見渡せる固定俯瞰視点（背後俯瞰視点）（図 5 の中央）
- 自身に合わせて移動するロボットの頭上から作業空間を見渡せる固定俯瞰視点（上空俯瞰視点）（図 5 の右）

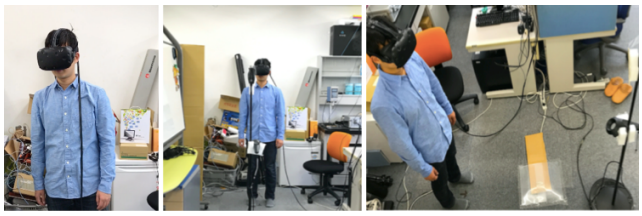

図 5　比較環境視点（左:一人称視点（提案手法），中央:背後俯瞰視点，右:上空俯瞰視点）

5.2 実験タスク

空間的な協調作業の遠隔化を実現するためには，本システムによって相互に位置関係の把握が可能，またお互いの動作などからノンバーバルな情報共有が可能であることが必要である．そこで本実験では，本システムを通して相互の位置関係の把握及びノンバーバルな情報共有ができているかを評価するための実験タスクを設定した．なお，本実験では視点によるノンバーバルな情報共有についても含めた使用感の評価を行うため，実験中の発話は禁止し，意思の疎通が必要な場面ではジェスチャを用いて行うものとする．被験者に与えた指示を記す．

(1) 比較環境の 3 環境のうち，実験環境を一つ決める．
(2) HMD を着用する前に，実験者が長さの目安として 1m をメジャーで示し，被験者はこれを肉眼で確認する．
(3) 被験者は HMD を着用する．
(4) 被験者はお互いの距離が 1m になるように移動する．被験者 2 名の間でジェスチャなどにより完了の合意をとり，被験者 2 名同時に「できました」と実験者に合図する．
(5) 1m の距離を保ったまま，一方の被験者が 2 歩前進し，同時にもう一方の被験者が 2 歩後退する．
(6) 同じく 1m の距離を保ったまま，(5) とは逆の被験者が 2 歩前進し，もう一方の被験者が 2 歩後退する．
(7) 被験者はお互いの距離が 2m になるように移動する．
(8) 目を閉じ，任意の方向へ一歩移動する．両被験者の移動が完了した後，目を開けて現在の距離を予想する．予想した値は声には出さず，実験者が渡した紙に その値を書く．
(9) 今回の環境で上記タスクを行った上での使用感を問うアンケートに回答する．

HMD に提示する映像の視点を変えて上記の流れを 3 環境全てに対して行う．なお，被験者が 3 つある比較環境で実

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

験を行う順番は，6 通りとなる．今回は 12 組の実験組それぞれで順序を変え，順序の違いによる結果への影響を相殺した．

実験タスクの中で特定の距離になるよう移動する（3），（4）のタスクにおいて，移動し終えた時の被験者とロボット間の距離をそれぞれシステムで測り，記録する．また，1m を保ちながら移動する（5），（6）のタスクにおいて，タスク中 1 秒に 1 回被験者とロボットの距離をシステムで測定し，その平均を記録する．これらの値を用いて平均誤差を求める．

5.3 アンケート

各比較環境において実験タスクの最後に配布したアンケートの内容は，以下のようになっている．なお，5 段階評価では 1 を低評価，5 を高評価としている．

＜5 段階評価項目＞

- 相手との位置関係は把握しやすかったか
- 実験者の指示に従って動く際，動きやすかったか
- 相手との意思の疎通（指示クリアの合意など）は取りやすかったか

＜自由記述項目＞

- 今回の環境の良い点があれば教えてください
- 今回の環境の悪い点があれば教えてください
- その他，何か感じたことがあれば教えてください

5.4 実験結果

実験タスクにおいて，被験者に対して与えた指示の距離とシステムが測定した実際の距離から，比較環境それぞれについて算出した平均位置誤差の結果を全てまとめると，図のようになった．

これを見ると，位置誤差に関しては一人称視点(提案手法)が最も小さいことがわかる．また，分散分析の結果，$p = 0.18 (p > 0.05)$となり F 値も下回っていることから，各視点によって位置誤差に差がないことが明らかとなった．

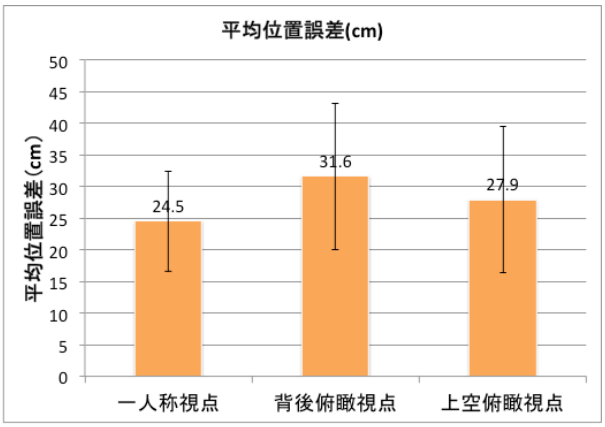

図 6　平均位置誤差（cm）

続いて，各環境においてタスクを終えた際に答えてもらった，使用感を問うアンケート の結果は図 7，図 8 のようになった．

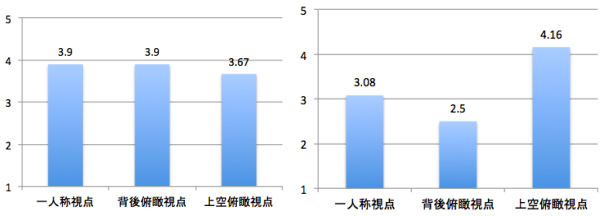

図 7 アンケート結果（左:動きやすさ，右:位置関係把握）

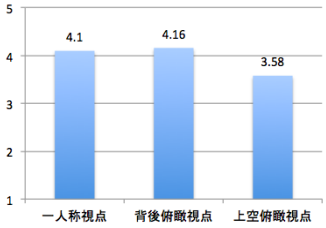

図 8　アンケート結果（意志疎通）

グラフを見ると，被験者の使用感としては，位置関係の把握を最もしやすかったのは上空俯瞰視点であった．また，動きやすさに関しては僅差となり，目立った違いは出なかった．意思疎通の取りやすさについては，上空俯瞰視点に比べ，提案手法及び背後俯瞰視点が若干評価が高いことがわかった．また，自由記述欄により，それぞれの環境の良い点，悪い点は以下の意見が得られた．

一人称視点(提案手法)

- 良い点
  - 相手の動きを把握しやすい
  - 距離感の変化がわかりやすい
  - 臨場感がある
  - 相手の表情までうかがえる
- 悪い点
  - 長時間使用するとロボットの揺れで少し酔う
  - 相手との距離感が近くなると足元が見えず，距離感を掴みにくくなる
  - 自分の体が見えない（手などを動かしても映像に映らない）

背後俯瞰視点

- 良い点
  - 大まかな距離感はすぐ掴める
  - 視点が動かないので酔いが少ない
  - 相手のジェスチャを確認しやすい
- 悪い点
  - 位置関係によって距離感が見やすい時と見にくい時がある
  - 相手と違う向きを向いていると動きづらい
  - 細かい距離感が掴みにくい（特に奥行き）

上空俯瞰視点

- 良い点
  - 相手との距離感が掴みやすい
  - 相手の移動が把握しやすい
- 悪い点

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

- 相手の顔が見られないため，意志の疎通難しい
- 対面している感覚が得られない
- 相手がどこを見ているかわからない

5.5 考察

5.5.1 位置誤差（定量評価）に関する考察

今回の実験結果では，提案手法が他の固定俯瞰視点と位置把握の精度で差がないという結果となった．上空俯瞰視点は位置関係の把握に適している視点であり，作業空間内の物や人のサイズ感を正しく把握することができれば，正確な距離感をつかむことができる視点である．この視点と同等の精度で，提案システムは距離感の把握をすることができるということがわかった．距離感把握の精度に差が出なかった理由としては，作業者が動いてからロボットが動き出すまでに誤差があるため，(5)，(6) などのタスクにおいて位置誤差が大きくなってしまったことが考えられる．相手とタイミングを合わせて一定の距離を保つタスクでは，相手との距離感を提示される相手の大きさのみで判断可能な一人称視点が距離を一定に保ちやすいと考えられるが，実験中の様子を見ると，実際に移動してからロボットが動くまでのラグに戸惑っている被験者も見られた．特に一人称視点では，比較環境の中で唯一移動によって視点も変化する環境であったため，動きが反映されるまでの時間差の影響を強く受けたのではないかと考えられる．この時差は位置合わせの際，通信を行う頻度をあげたり，ハードの性能をよくすることによって解決できると考えられる．

5.5.2 アンケート（定性評価）に関する考察

また，使用感に着目すると，上空俯瞰視点に比べ，提案手法や背後俯瞰視点は意思疎通が取りやすいことがわかる．この理由として，2 つの視点では正面から相手の身体動作を見ることができるため，対面時と同じ感覚で意思疎通を測ることができるからではないかと考えられる．これに対して,アンケートの自由記述においても上空俯瞰視点は「意志の疎通が取りづらい」，「対面感が得られない」などの意見が多く見られた．これらのことから，相手の見え方の異なる上空俯瞰視点では他の視点に比べ，意志の疎通が取りづらいことがわかった．今回の実験では，一辺数メートル程度の比較的小規模な作業空間で実験を行ったため，俯瞰視点にしても極端に作業者の姿が小さく映ることもなく，上からの視点でも最低限のジェスチャは確認できたが，これに関しては作業空間が大きくなればなるほど，固定俯瞰視点による作業は難しくなる．広い作業空間で協調作業を行った場合,提案手法の有用性が高まることが考えられる．

これらのことから，空間的な協調作業を行う際，提案手法は遠隔地とのノンバーバルな情報を共有しつつ，遠隔地にいる相手との位置関係や距離感を把握する際，有効的な手法であると言える．

6. おわりに

我々は普段の生活から様々な協調作業を行なっている．これらの協調作業を遠隔で行うための研究が多く行われており，様々な手法を用いて協調作業の遠隔化を支援している．遠隔で会議やコミュニケーションを行う方法として，プロジェクションマッピングやサロゲートロボットなどを利用した研究があり，これらを用いて，会議や会話など移動を必要としない協調作業を遠隔化している．これに対して，相手との位置関係や動作に合わせて作業を行う空間的な協調作業の遠隔化には遠隔地の作業者の動作などの情報と，空間的な位置関係の情報を共に作業する作業者同士に共有させる必要があり，既存の手法ではそれらを満たすことは難しい．そのため，遠隔でダンスやスポーツといった空間的な協調作業を行うことは未だに困難である．

そこで本研究では，遠隔地の相互サロゲートによる空間的な遠隔協調作業の支援を提案した．遠隔地に自身の動きに合わせて移動するロボットを用意し，一人称視点実映像で遠隔地の相手を確認することができる．このサロゲートを双方向に行うことで，双方の作業者が空間内を自由に動き回り，かつ遠隔地の相手の詳細なノンバーバルな情報を実映像で確認することが可能になる．これにより，ノンバーバルな情報の共有と空間的な位置関係の共有の両立を実現する．

提案環境が実際に被験者の空間的な位置関係把握の精度を測定する実験を行った．実験では，位置関係を把握しやすい視点とされる背後及び上空からの固定俯瞰視点を比較対象とし,指定した位置関係を取るタスクを被験者に課し，その精度と使用感を問うアンケートを取り評価を行った．その結果，位置関係の把握に関して俯瞰視点と同等以上の結果を得た.この結果から，本提案が実映像ベースの遠隔作業支援として，俯瞰視点と同等の位置関係把握を実現していることが示され，ノンバーバルな情報と位置関係把握の共有を両立できることがわかった．

参考文献

[1] Andrew Jones, Magnus Lang, Graham Fyffe, Xueming Yu, Jay Busch, Ian McDowall, Mark Bolas, Paul Debevec, Achieving Eye Contact in a One-to-Many 3D Video Teleconferencing System, ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009,Volume 28, Issue 3, Article No.64, Augest 2009.

[2] Leif Handbarg, Charlie Gullstro□m, Joke Kort and Jimmy Nystro□m. Spatial and Social Connectedness in Web-based Work Collaboration. CSCW '16 COMPANION, 2016, p. 45-48.

[3] Mamoun Nawahdah, Tomoo Inoue, Influence on User's Communication in BHS Videoconferencing: Superimposition of a Remote Person's Figure on the Local Back- ground, CHI 2013, pp.991-996, April 2013.

[4] Doug Williams, Ian Kege, Marian Ursu, Pablo Cesar, Jack Jansen, Erik Geelhoed, Andras Horti, Michael Frantzis and Bill Scott. A Distributed Theatre Experiment with Shakespeare. MM '15 Proceedings of the 23rd ACM

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

international conference on Multimedia, 2015, p. 281-290.
[5] Xianhui Wang, James Laffey, Wanli Xing, Yanfei Ma and Janine Stichter. Exploring embodied social presence of youth with Autism in 3D collaborative virtual learning environment: A case study. Computers in Human Behavior. 2016, vol. 55, p. 310-321.
[6] Tomislav Pejsa1, Julian Kantor, Hrvoje Benko, Eyal Ofek and Andrew Wilson. Room2Room: Enabling Life-Size Telepresence in a Projected Augmented Reality Environment. CSCW'16. 2016, p. 1716-1725.
[7]] 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. 2015.5, p.11-14
[8] Susumu Tachi. Telexistence: Enabling Humans to Be Virtually Ubiquitous. Published by the IEEE Computer Society. 2016, p. 8-14.
[9] Arjun Nagendran, Anthony Steed, Brian Kelly and Ye Pan. Symmetric telepresence using robotic humanoid surrogates. COMPUTER ANIMATION AND VIRTUAL WORLDS, vol.26, 2015, p.271-280.

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan