

仮想鏡を利用した遠隔MR作業支援

亀井 銀河^{1,a)} 吉川 誠¹ 岡田 謙一^{2,3}

受付日 2011年4月15日, 採録日 2011年10月3日

概要: 本研究は, 複合現実感 (MR) 空間における実物体を利用した遠隔協調作業において, 正確に実物体と仮想物を重ね合わせるための仮想鏡を提案する. 遠隔協調作業支援の研究は多岐にわたり, 近年 MR 技術を利用するシステムが研究された. このシステムでは遠隔地にいる作業者がそれぞれ同形・同サイズの実物体を所持している環境において, 遠隔の相手の実物体を HMD の利用によって仮想物として現実空間に表示し, 仮想物に自分の実物体を重ね合わせることで遠隔間の物体の位置を合わせることができる. このことを利用して遠隔に対する作業指示も可能となる. しかし MR 空間では立体的な認知が難しく, 仮想物に対し実物体を正確に重ね合わせることができないという問題点が見られた. そこで本提案である仮想鏡によって MR 空間の立体的な認知を支援し, 指示に対して正確な重ね合わせを実現する. 3次元仮想物体として面対称あるいは点対称な位置に鏡像を表示することで実物体と仮想物の位置関係を視覚的に分かりやすくする. 提案概念に基づき, 対称の種類や鏡の設置角度の異なる 3種類の仮想鏡を実装した. そして仮想鏡のない環境との比較実験により, 遠隔 MR 協調作業における仮想鏡の有効性が明らかになった.

キーワード: 遠隔協調作業, ポインティング手法, 複合現実感, 鏡

Remote MR Cooperative Work with Virtual Mirrors

GINGA KAMEI^{1,a)} MAKOTO KIKKAWA¹ KENICHI OKADA^{2,3}

Received: April 15, 2011, Accepted: October 3, 2011

Abstract: In this research, we propose virtual mirrors for adjustment of position between real and virtual objects in remote cooperative work with Mixed Reality (MR). There are various researches to achieve remote cooperative work. Recently, a system which supports remote cooperative work with MR technology has been studied. In this system, each user has a real object. The users achieve instruction between remote sites by adjusting real object to virtual object which shows the real one in remote site. But users cannot accurately adjust real object because three-dimensional spatial perception is difficult for them in MR space. Then, we achieve accurate adjustment by supporting the spatial perception with virtual mirrors. Unlike real mirrors, a virtual mirror presents the reflected image positioned on plane-symmetrical or point symmetrical point in 3D workspace. The virtual mirrors make positional awareness easy. We implemented three virtual mirrors distinguished by the kind of symmetry and the angle of mirror. By experiments for comparing to the case in which mirror was not used, we found the virtual mirrors effective for remote MR cooperative work.

Keywords: remote cooperative work, pointing technique, mixed reality, mirror

¹ 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University,
Yokohama, Kanagawa 223-0061, Japan

² 慶應義塾大学理工学部情報工学科
Department of Computer and Information Science, Fac-
ulty of Science and Technology, Keio University, Yokohama,
Kanagawa 223-0061, Japan

³ 独立行政法人科学技術振興機構
Japan Science and Technology Agency, Chiyoda, Tokyo 102-
0076, Japan

^{a)} kamei@mos.ics.keio.ac.jp

1. はじめに

離れた場所にいる人たちによる協調作業を支援する手法が研究されている. 初期の遠隔作業支援システムでは参加者同士がネットワークを介して電子データを共有し, それを利用して協調作業を行うものが一般的であった [1]. しかしこれらのシステムは現実空間における作業を支援することができなかった. その後, 複合現実感 (MR) の技術

を用いることにより仮想世界へ現実世界の情報を取り込むことが可能となり、現実世界の情報を遠隔で共有する協調作業への応用が試みられた [2].

そして現実世界の実物体の情報を遠隔で共有するために MR 技術を利用した作業支援手法が研究されている [3], [4]. この手法では作業者はヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着し、お互いに同形・同サイズの実物体を所持する。遠隔の作業者の所持している実物体を HMD によって現実の作業空間に CG で仮想物として表示し、その仮想物に自分の実物体を重ねて追従させることで、遠隔間の実物体の位置を合わせることができる。これを利用して遠隔の作業者に指示を伝達することも可能となる。しかし MR 空間では空間を立体的に認知することが困難で正確に仮想物に実物体を重ね合わせることができないという問題があった。

本研究では遠隔 MR 作業支援における空間認知支援のための 3 つの仮想鏡を提案する。従来の VR・MR における仮想鏡は鏡面上に鏡像を表示するものが主だが、本稿で提案する仮想鏡は面対称または点对称の位置に 3 次元仮想物体として鏡像を表示する。そして遠隔からの指示を示す仮想物を基準に鏡像を提示することで視覚的に実物体の位置の誤差が分かりやすくなり、正確に実物体を仮想物に重ね合わせることができる。また、提案手法を実現するシステムを実装し、評価実験により従来手法と 3 つの仮想鏡の合計 4 手法で比較を行う。そして遠隔協調作業における仮想鏡の有効性を検討する。

2. 関連研究

まず遠隔協調作業の研究について述べる。遠隔環境で実物体を用いる場合、対面環境と違って作業者間で同じ実物体を使うことが物理的に不可能である。そこで遠隔地にある実物体どうしの状態の共有手法が遠隔作業支援では重要である。過去に映像を利用して実物体を共有する手法が考えられたが、これは両者が実物体を扱う場面は想定されていなかった [5]。また電磁石による物理的な物体の状態共有も提案されたが相手の操作の影響によって作業に支障をきたすという問題点があった [6]。これらの問題点に対し、MR 技術を用いた実物体の状態共有が提案された [3], [4]。遠隔の作業者の実物体を仮想物として表示し、それに自分の実物体を重ねて追従させることで、遠隔間の実物体の共有を実現する。この手法により、相手の操作の影響を受けずお互いの実物体を共有することが可能となった。応用例として遠隔における製作・修理作業の訓練や伝統工芸の伝承を考えており、細かい指示の伝達を目指している。

次に鏡に関連した研究について述べる。Hosoya らはディスプレイに表示された遠隔にある物体をユーザが操作するときに鏡の表現を利用し [7]、Bimber らは実際の鏡にテーブルトップ上の仮想情報を映し出した [8]。また、VR・MR 環境ではユーザにとって 3 次元的に空間を認知することが

困難であり、この問題を解決するためのシステムも研究されている。Osawa は 3D の仮想物を正確に操作するために視点を自動的に調整する方法を提案した [9]。より正確な操作が可能になるが、MR 空間ではなく VR 空間を利用した手法である。Chastine らは MR 空間における空間認知を評価し、仮想物に影をつけることで認知しやすいという結果を得た [10]。しかし影を用いる場合、影を表示する平面が必要である。他には空間認知の困難な 3 次元空間において位置を指定するようなポインティング手法も研究されており、Naito らは立体ディスプレイを備えた円筒型マルチタッチインタフェースを作成し、3 次元空間へのポインティング手法を提案した [11]。また Zhai らは位置指定のためのカーソルを半透明な立体にすることで奥行きを把握を支援している [12]。そして鏡を利用して空間認知を支援するシステムも研究されている。Navab らは MR 空間において仮想的に鏡を生成し、複数の視点で作業対象を見ることができるシステムを提案した [13], [14]。このシステムでは現実の鏡のように平面的に作業対象を映し出す。

3. 空間認知のための仮想鏡

3.1 遠隔 MR 作業支援における空間認知

著者らは遠隔 MR 作業支援システムにより細かい指示の伝達を目指している。しかし仮想物と実物体を正確に重ね合わせることは困難であり、実物体の操作を高精度で伝達することができないという問題点がある。

図 1 はいずれも作業者の視点映像であり、遠隔の指示者からの指示を示す黄色の仮想物の先端に作業者が実物体の先端を重ね合わせる場面である。図 1(a) では指示よりも奥の位置、図 1(b) では手前の位置と作業者はそれぞれ違う場所を指しているが、どちらの場合も指示どおりに指しているように見え、遠近感が分かりにくい。またヘッドマウントディスプレイを通して見る MR 空間ではディスプレイの解像度や遅延等の影響を受け、裸眼に比べて空間の立体的な認知が困難となる。以上の要因からユーザは MR 空間において仮想物に実物体を正確に重ね合わせることができない。そこでこの問題点を解決するためには、立体的な空間認知を支援する手法が必要である。空間認知の支援として過去に MR 空間の仮想物の影を用いた手法が考えられたが [10]、影を表示する平面が存在する場面ではしか効果がない。指示位置に実物体を正確に重ね合わせるために別の空間認知支援手法が求められる。

3.2 仮想鏡を用いた空間認知の支援

本稿では図 1 のようなポインティングデバイスで指示者が指した位置を、作業者もポインティングデバイスを用いて指し示す作業を正確に達成することを目的とする。この作業において著者らは空間認知支援のために鏡の“作業に対する視点を増やすことができる”という特性を利用でき

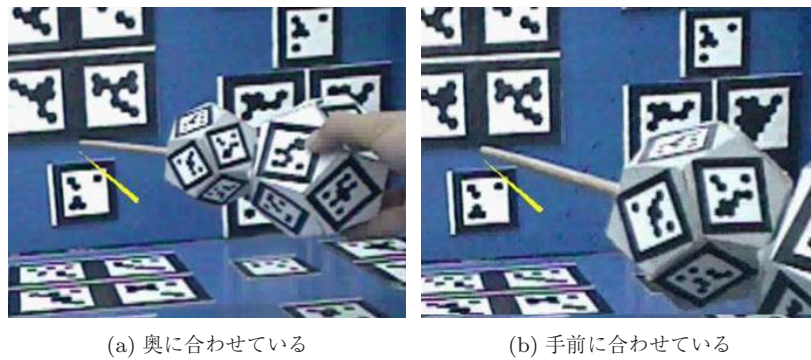


図 1 指示に対する重ね合わせ
Fig. 1 Adjustment for instruction.

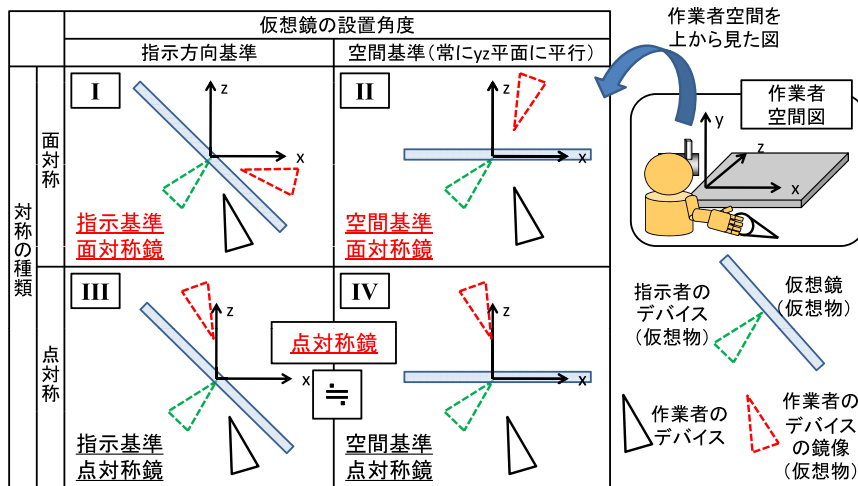


図 2 3つの仮想鏡
Fig. 2 Three virtual mirrors.

ると考えた。従来の VR, MR における鏡は鏡面上に鏡像を表示させるものが主であり、視点を増やすことで正確な作業を可能としている。それに対し本稿で述べる仮想鏡は鏡像を鏡面内ではなく、空間内の面対称あるいは点对称の位置に 3次元仮想物体として存在させている。そして鏡面を指示位置に固定することで、正確に指示位置に重ね合わせられたときに指示を示す仮想物とポインティングデバイスと鏡像の 3つの先端が 1点で重なるようになり、立体空間において正確に重ね合わせられたことを一目で把握可能とする、仮想鏡を用いた新しい手法を提案する。この手法により遠隔 MR 作業支援システムの空間認知に関する問題を解決でき、遠隔間における高精度な指示の伝達が可能となる。応用例としては遠隔での組み立て作業の訓練や伝統工芸の伝承があげられる。これらでは微妙な位置の誤差が作業結果に影響すると考えられ、指示された位置を確実に伝達することが求められる。

他に空間認知の支援では複数の映像を用いて多視点から作業対象を見ることで立体的に認知する手法が考えられるが、たくさんの映像を同時に見なければならぬ。本提案ならば鏡像は作業対象を中心に表示され作業対象のみを見ればよいので容易に立体的な認知が可能となる。また仮想

物の影を表示することによる手法も考えられるが、この場合は影を表示する面を設定する必要があり、表示面の位置によって効果も変わってくる。一方、本提案では環境の設定が必要なくどのような場面でも適用可能である。

3.3 3つの仮想鏡

鏡像の提示法には対称の種類と仮想鏡の設置角度の 2つの要素がある。図 2 を用いてそれぞれの要素について説明する。まず対称の種類には面対称と点对称の 2つが考えられる。面対称は現実の鏡と同様に鏡面を基準にして対称の位置に鏡像を提示する。図 2 (I), (II) からは仮想鏡を基準に面対称に鏡像が表示されていることが分かる。一方、点对称は 1点を基準にして鏡像を提示する。図 2 (III), (IV) ではポインティングデバイスの先端を基準に点对称に鏡像が提示されている。次に仮想鏡の設置角度では設置角度が指示方向を基準とする方法と作業空間を基準とする方法の 2つに分けることができる。指示方向を基準とする場合は指示を表す仮想物の角度に応じて仮想鏡を設置する。図 2 (I), (III) ではポインティングデバイスの方向に垂直となるように設置されている。一方、作業空間を基準とする場合は仮想鏡の設置位置は指示に依存するが、角度は作

業空間の座標系において一定とする。空間認知において特に奥行き方向の認知が困難であることから、図 2 右上の作業空間図のように横方向に x 軸、高さ方向に y 軸、奥行き方向に z 軸としたとき、図 2 (II), (IV) に示すようにつねに xy 平面に平行となるように仮想鏡を設置している。

対称の種類 2 つと仮想鏡の設置角度 2 つから計 4 つの仮想鏡が考えられるが、点対称に鏡像を提示する 2 つの仮想鏡では図 2 (III), (IV) に示すように仮想鏡の角度によらず、どちらも同じ位置に鏡像が提示される。このことから今回は指示方向を基準に面対称に鏡像を提示する指示基準面対称鏡、作業空間を基準に面対称に提示する空間基準面対称鏡、そして点対称に提示する点対称鏡の 3 つを提案する。つねに奥行き方向に鏡像が提示される空間基準面対称鏡が効果的であると期待できるが、一方で様々な角度で鏡像が提示される指示基準面対称鏡がよいとも考えられる。また点対称鏡ならば奥行き方向以外の方向においても空間認知を支援できると期待される。

3.4 仮想鏡を利用した遠隔 MR 作業支援

仮想鏡を用いた遠隔 MR 作業支援の流れを図 3 を用いて説明する。なお、図 3 は仮想鏡を代表して空間基準面対称鏡を使用している場面である。左が指示者、右が作業者を示しており、指示者の持っているポインティングデバイスが作業者には仮想物として見えている。図 3 は指示者の指示した位置に作業者もデバイスを合わせようとしている場面であり、つまり指示者のデバイスの先端に作業者もデバイスを重ね合わせることが目的である。このとき作業者空間において指示者のデバイスの先端の位置を中心に仮想鏡を提示することで鏡像は仮想鏡を挟んで作業者のデバイスと対称の位置に現れる。正確に重ね合わせていないと作

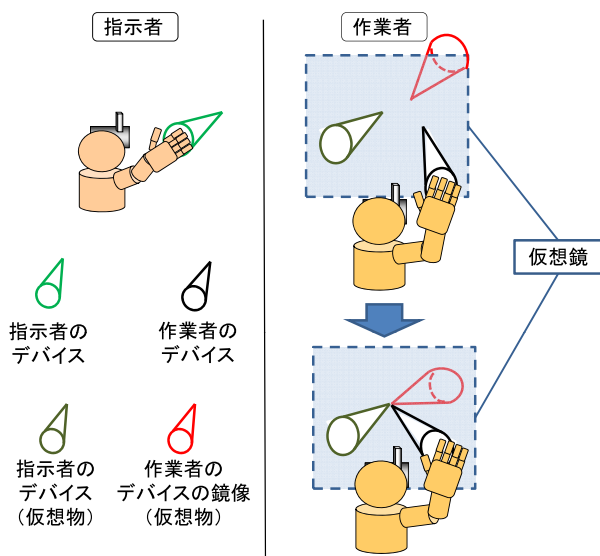


図 3 仮想鏡を利用した遠隔 MR 作業支援の流れ

Fig. 3 Workflow of remote MR cooperative work with virtual mirror.

業者上図に示されるように指示者のデバイスと作業者のデバイス、そして鏡像の 3 つの先端の位置は一致しないが、正確に重ね合わせると作業者下図のように一致するため、しっかりと重なり合ったことを目で見て知ることができるようになる。仮想鏡の種類によって鏡像の表示位置は異なるが、いずれの鏡においても正確に位置が重なったときにはデバイスの先端が一致する。仮想鏡によって指示に対して正確に物体を重ね合わせることが可能となる。

4. 仮想鏡を利用した遠隔 MR システムの実装

4.1 システム概要

本提案システムの構成を図 4 に示す。MR 空間構築部はキヤノン株式会社の MR プラットフォームを利用し、それに著者らが遠隔同期管理部を組み込むことでシステムを構築した。

ユーザはビデオシースルー型 HMD を装着する。MR 空間構築部では HMD で得た映像から 2 次元マーカを認識することで作業空間や実物体の位置検出を行い、CG を重ねた映像を HMD に映し出すことで MR 空間を構築する。使用した HMD はキヤノン株式会社製の VH-2002 であり、両眼ビデオシースルー型なのでユーザは MR 空間を立体視している。遠隔同期管理部では一方の空間で物体の状態が変化したときに、もう一方の空間にその情報を送信する。送信された情報をもとに仮想物を表示することで遠隔間の実物体と仮想物の同期をとる。本システムは以上の 2 つの機能をリアルタイムで処理しながら約 30 fps で動作する。なお、本稿の評価実験は一方の空間のみで実施した。

4.2 仮想鏡の実装

鏡像の位置は座標変換を用いて求めている。図 5 のように作業空間のある 1 点を基準とした世界座標系から実物体への位置ベクトルを A 、仮想鏡への位置ベクトルを B 、鏡像への位置ベクトルを A' とすると仮想鏡から鏡像への位置ベクトル $A' - B$ は仮想鏡から実物体への位置ベクトル $A - B$ を鏡面に対して対称に変換することで得られるので A' を算出し鏡像の位置を求めることができる。特に空間基

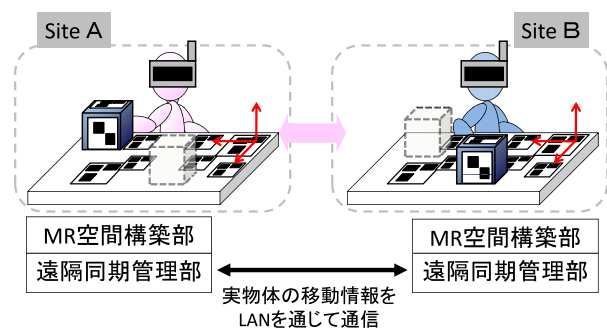


図 4 遠隔 MR システム構成

Fig. 4 Architecture of remote MR system.

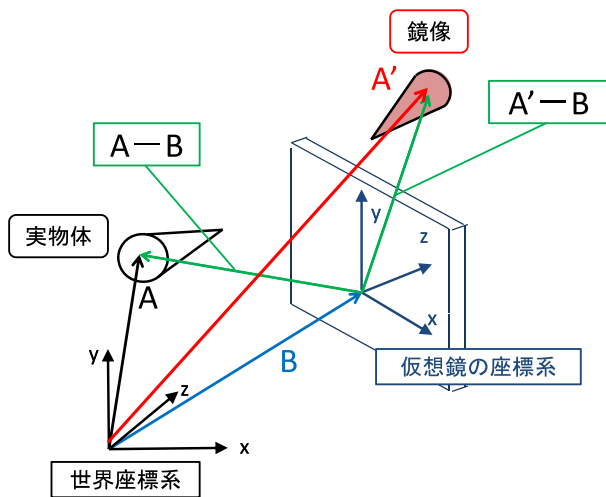


図 5 面対称の実装アルゴリズム

Fig. 5 Algorithm of plane symmetry mirror.

準面対称鏡の場合は仮想鏡がつねに世界座標系の xy 平面に平行なので $A-B$ の z 成分を、そして点対称鏡の場合は $A-B$ のすべての成分を反転すれば位置を求められる。そして基準となる面あるいは点で対称となるように鏡像を描画する。鏡は半透明な白色で 1 辺 30cm の正方形として指示位置を中心に描画される。点対称鏡の場合は鏡の設置角度が関係ないので空間基準面対称鏡と同様に xy 平面に平行に設置している。鏡像は 3 次元仮想物体として空間内に存在しているので鏡の描画範囲を越えても鏡像は描画され、鏡の横や裏からも鏡像を見ることができる。さらにポインティングデバイスを鏡より奥に移動したときには鏡像は鏡面の手前に移動する。なお、鏡や鏡像といった仮想物と現実物体のオクルージョン処理は今回行わなかった。しかしデバイスの先端 1 点を重ね合わせるという作業においては仮想物との前後関係は影響しないと考えられる。

5. 仮想鏡の評価

指示基準面対称鏡・空間基準面対称鏡・点対称鏡を使う 3 種類の条件と従来手法である仮想鏡がない条件の合計 4 種類の条件で重ね合わせの正確性および容易性に関して比較検討を行った。

5.1 評価実験方法

評価実験の想定場面としては被験者は作業役であり、指示者の指示を示す仮想物に対して実物体を重ね合わせるという作業をしてもらった。実験の手順は以下のとおりである。被験者はポインティングデバイスを所持しており、実験開始と同時に仮想物が表示されるのでそれに対し重ね合わせを行う。なお被験者には動きの制限はなく、頭を動かして様々な角度から確認しながら作業をしてもらう。被験者が指示に対して重ね合わせることができたと判断したら合図を出してもらい、その瞬間の指示との誤差を取得する。

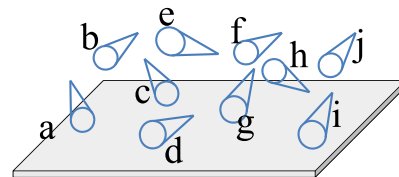


図 6 10 カ所の指示位置

Fig. 6 Ten locations for pointing.

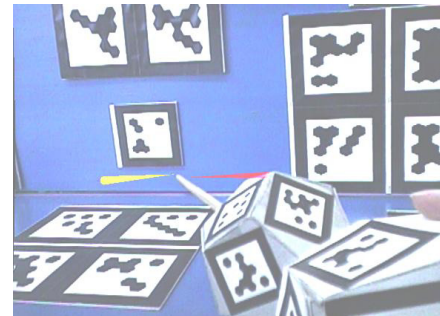


図 7 被験者視点映像

Fig. 7 View of a participant.

その直後に次の位置に仮想物が移動するので、それに再び重ね合わせてもらう。この作業を各条件で 10 回行うと実験終了となる。1 つの条件に対する測定項目は重ね合わせの誤差 10 回分と 10 回作業を行ったときにかかった時間である。誤差はマーカによる位置検出によって x, y, z の 3 つの成分で測定した。図 2 と同様に被験者の初期姿勢において横方向に x 軸、高さ方向に y 軸、奥行き方向に z 軸となっている。

被験者は 15 名の学生であり、男性が 13 名、女性が 2 名、また MR 空間での作業に慣れている学生は 3 名である。すべての被験者は実験の前に鏡なしの条件でポインティングの練習を行った。これは実験中の作業への慣れの問題をなくすためである。そして十分練習した後に被験者はすべての条件で作業を行う。まずすべての被験者は鏡なしの条件で作業を行った。その次には指示基準面対称鏡（以下、指示）、空間基準面対称鏡（以下、空間）、点対称鏡（以下、点）の順に行った人が 5 人、空間、点、指示の順の人が 5 人、点、指示、空間の順の人が 5 人となっている。また指示位置を示す仮想物は事前に決めた 10 カ所の位置をコンピュータに記録しておき、順々に提示した。この 10 カ所の指示位置は図 6 のように作業空間にまんべんなく位置するように決定しラベル付けを行った。このラベルを並べ替えて提示順序のパターンを 4 つ作り、条件ごとに使い分けた。どの条件にどの順序パターンを用いるかは被験者ごとに異なるが、10 カ所の位置自体はポインティングの難易度に違いを出さないためすべての被験者で共通となっている。

図 7 は被験者の視点映像である。黄色い仮想物が指示者の指示を示しており、これの先端にポインティングデバ

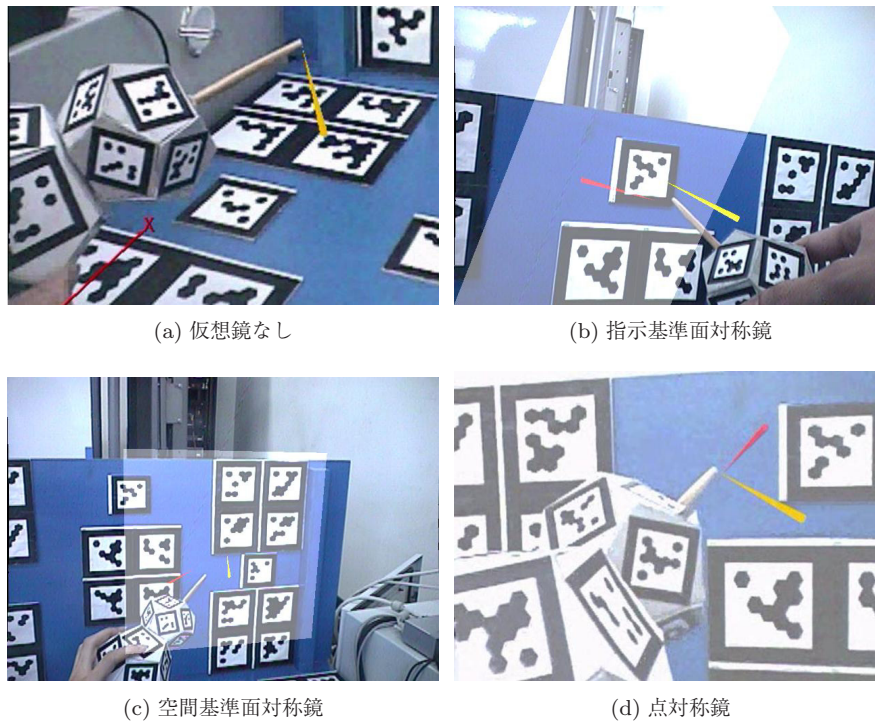


図 8 各条件における被験者の視点映像

Fig. 8 Views of a participant in the cases.

表 1 指示に対する誤差

Table 1 Location error.

	指示に対する誤差 [mm]		
	x 軸	y 軸	z 軸
仮想鏡なし	20.0 ± 12.5	25.1 ± 15.5	68.5 ± 46.9
指示基準面対称鏡	4.5 ± 2.0	3.8 ± 1.5	5.1 ± 2.7
空間基準面対称鏡	3.8 ± 1.9	3.8 ± 1.4	6.0 ± 3.1
点対称鏡	5.3 ± 5.3	7.5 ± 5.7	15.0 ± 10.1

表 2 作業時間

Table 2 Completion time.

	時間 [秒]
仮想鏡なし	86.7 ± 21.5
指示基準面対称鏡	146.9 ± 56.6
空間基準面対称鏡	144.2 ± 31.0
点対称鏡	123.2 ± 31.5

イスの先端を合わせる。また図 7 は空間基準面対称鏡を使用している場面であり、赤い鏡像が表示されている。この図では指示に対して正確に重ね合わせているので、デバイス、指示、鏡像の先端が 1 点で重なっていることが分かる。

次に図 8 は各条件の違いを示している。図 8(a) は従来手法である仮想鏡がない条件である。指示を示す仮想物とデバイスの木の部分の長さは同じであり、仮想鏡がない条件では被験者はそれを参考にして重ね合わせてもらう。図 8(b) と図 8(c) では面対称鏡を使用している。図 8(b) では鏡面を表す白い仮想物が指示に対して垂直となっており被験者の視点からは斜めに見えること、そして図 8(c) では鏡面が xy 平面に平行になっていることが分かる。図 8(d) では点対称鏡を使用している。デバイスに対する赤い鏡像が通常の鏡と異なり点対称の位置に表示されていることが示されている。

5.2 実験結果と考察

表 1 は各条件における指示に対する誤差の平均を示し

ている。 x 軸、 y 軸、 z 軸すべてにおいて仮想鏡がある条件の方が仮想鏡がない条件よりも誤差が小さくなり、一元配置分散分析によりすべての軸において有意差がみられた ($p < .05$)。そして Tukey 法により分析を行った結果、すべての軸において、鏡なしの条件に対して他の鏡ありの条件すべてで有意差が認められた ($p < .05$)。指示に対する重ね合わせの精度が向上したことから、仮想鏡がユーザの空間認知の支援に役立つといえる。また実験中は多くの被験者が頭を動かし様々な角度から確認をしていたが鏡の有無で誤差に差があることから、頭を動かして確認するだけでは不十分であることも分かる。なお 3 つの仮想鏡の間で有意差は見られなかった。また表 2 では各条件における 10 試行の合計作業時間の平均を示している。仮想鏡がある条件の方が仮想鏡がない条件よりも時間がかかるという結果となった。これは仮想鏡がある条件では被験者が正確に重ねるために時間を使うのに対し、仮想鏡がない条件では正確に重ねられているかが被験者に分からないので時間をかけても無駄であると判断してすぐに合図を出してしまったことが原因だと考えられる。なお作業時間においても 3

つの仮想鏡の間で有意差は見られなかった。

被験者の感想では空間基準面対称鏡が最も使いやすかったというコメントを複数人から得ることができた。これは日常的に人間が鏡を正面から見るのがほとんどであるので、つねに被験者と対面する角度で鏡が提示される空間基準面対称鏡が普段と同じで使いやすかったからだと考えられる。同様の理由から指示基準面対称鏡においては頭を動かして鏡を正面から見ようとする被験者が多く見られた。また面対称鏡は現実の鏡と同様の挙動をとるので被験者も実験開始後すぐに使いこなすことができていた。このように面対称鏡ならば直感的に使用できることも、空間基準面対称鏡が使いやすかった要因と考えられる。一方、点対称鏡は奥行き方向以外にも効果があると期待していたが実験結果から面対称鏡との違いは見られなかった。点対称鏡では鏡像は現実とは異なる動きをとるので違和感を覚えたという被験者もいたことから面対称鏡に比べて点対称鏡は操作が直感的ではないといえる。これにより期待された効果が得られなかったと考えられる。

6. おわりに

著者らは遠隔 MR 作業支援システムによって遠隔地の実物体を仮想物で表すことで細かい指示の伝達を目指している。しかし MR 環境では立体的な空間の認知がしにくく、仮想物と実物体を正確に重ね合わせることは困難である。

そこで本稿では指示基準面対称鏡、空間基準面対称鏡、点対称鏡という3つの仮想鏡を用いた遠隔 MR 作業支援を提案した。仮想鏡は指示位置を基準にして実物体の位置に対応した立体的な鏡像を表示する。指示に対して実物体を正確に重ね合わせたときには物体と指示と鏡像の先端が重なり合うので、指示に対する自分の物体の位置の誤差が視覚的に分かりやすくなる。本研究では実物体と仮想物の重ね合わせを正確に行うことを目標とした。

そして本提案を実現するシステムを実装し、評価実験を行った。従来手法と3つの仮想鏡の合計4手法で比較を行った結果、3つの仮想鏡いずれにおいても従来手法より指示に対する誤差が小さくなった。このことから仮想鏡がユーザの空間認知の支援に効果があることが分かり、また使用感に関して被験者のコメント等から空間基準面対称鏡が最も直感的で使いやすいことが分かった。以上から仮想鏡、特に空間基準面対称鏡が遠隔 MR 作業支援において有効であるという結論を得ることができた。

謝辞 本研究の一部は CREST の支援により行われました。

参考文献

- [1] 福井健太郎, 喜多野美鈴, 岡田謙一: 仮想空間を使った多地点会議システム: e-MulCS, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.11, pp.3375-3384 (2002).
- [2] Wesugi, S. and Miwa, Y.: Facilitating interconnectedness between body and space for full-bodied presence – Utilization of Video projection “Lazy Susan” communication system, *7th Annual International Workshop on Presence (PRESENCE 2004)*, pp.208-215 (2004).
- [3] 玉木秀和, 坂内祐一, 山本 峻, 岡嶋雄太, 岡田謙一: MR 空間における準同期的な実物体共有による遠隔作業支援, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.12, No.4, pp.529-536 (2007).
- [4] 松山岳史, 亀井銀河, 坂内祐一, 岡田謙一: チェックイン・チェックアウトモデルを適用した MR 遠隔協調作業システム, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.1, pp.284-292 (2011).
- [5] Kuzuoka, H.: Spatial Workspace Collaboration: A Shared View Video Support System for Remote Collaboration Capability, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'92)*, pp.533-540 (1992).
- [6] Brave, S., Ishii, H. and Dahley, A.: Tangible interfaces for remote collaboration and communication, *Proc. 1998 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'98)*, pp.169-178 (1998).
- [7] Hosoya, E., Kitabata, M., Sato, H., Harada, I., Nojima, H., Morisawa, F., Mutoh, S. and Onozawa, A.: A Mirror Metaphor Interaction System: Touching Remote Real Objects in an Augmented Reality Environments, *2nd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, p.350 (2003).
- [8] Bimber, O., Encarnacao, L.M. and Schmalstieg, D.: Real mirrors reflecting virtual worlds, *IEEE Virtual Reality Conference 2000 (VR 2000)*, pp.21-28 (2000).
- [9] Osawa, N.: Automatic adjustments for efficient and precise positioning and release of virtual objects, *Proc. 2006 ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications (VRCIA'06)*, pp.121-128 (2006).
- [10] Chastine, J. and Zhu, Y.: The Cost of Supporting References in Collaborative Augmented Reality, *Proc. Graphics Interface 2008 (GI'08)*, pp.275-282 (2008).
- [11] Naito, M., Shizuki, B., Tanaka, J. and Hosobe, H.: Interaction Techniques using a Spherical Cursor for 3D Targets Acquisition and Indicating in Volumetric Displays, *Proc. 13th International Conference Information Visualisation (IV'09)*, pp.607-612 (2009).
- [12] Zhai, S., Buxton, W. and Milgram, P.: The partial-occlusion effect: Utilizing semitransparency in 3D human-computer interaction, *ACM Trans. Computer-Human Interaction*, Vol.3, No.3, pp.254-284 (1996).
- [13] Bichlmeier, C., Heining, S.M., Feuerstein, M. and Navab, N.: The Virtual Mirror: A New Interaction Paradigm for Augmented Reality Environments, *IEEE Trans. Medical Imaging*, Vol.28, No.9, pp.1498-1510 (2009).
- [14] Navab, N., Feuerstein, M. and Bichlmeier, C.: Laparoscopic Virtual Mirror New Interaction Paradigm for Monitor Based Augmented Reality, *IEEE Virtual Reality Conference 2007 (VR'07)*, pp.43-50 (2007).



亀井 銀河 (学生会員)

2010年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科博士前期課程在学中。複合現実感を用いた遠隔協調作業の研究に従事。



吉川 誠

2011年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科博士前期課程在学中。複合現実感を用いた遠隔協調作業の研究に従事。



岡田 謙一 (フェロー)

慶應義塾大学理工学部情報工学科主任教授，工学博士。専門は，CSCW，グループウェア，CHI。学会誌編集主査，論文誌編集主査，GN研究会主査，日本VR学会理事等を歴任。現在，情報処理学会理事，電子情報通信学会HB/KB幹事長。本学会論文賞（1996，2001，2008年），本学会40周年記念論文賞，IEEE SAINT'04，ICAT'07最優秀論文賞等を受賞。情報処理学会フェロー，IEEE，ACM，電子情報通信学会，人工知能学会各会員。