

視点座標を基準にした遠隔 MR 作業指示

岡嶋雄太^{†1} 松山岳史^{†1}
坂内祐一^{†2} 岡田謙一^{†3,†4}

近年、様々な場面で遠隔地にいる熟練した技術者からの技術伝承や、遠隔地における作業現場での作業指示が必要とされる現場が増えてきている。本稿では、指示者の視覚情報が重要となる作業指示を対象とし、作業者が遠隔地にいる指示者の視覚情報を共有して操作や指示を観察し、同時に自分の作業を行うことができる環境を実現する、「視点座標を基準にした遠隔 MR 作業指示」を提案する。作業者空間に実物体と合同の 3 次元仮想モデルを指示者が見ている同じ視点位置に提示し、仮想モデルから作業者は指示者が物体を見ている向き・距離を把握し、同時に仮想モデルに自分の実物体を重ね合わせることで、指示者とまったく同じ操作を行うことができる。本手法によって物を手に持って動かす作業を遠隔に伝え、デバイスや道具を持って行う作業を遠隔から効果的に教育・指示できる環境の実現が可能である。本稿ではこの提案概念を実現するためのシステムを実装し、評価実験より提案手法の有効性を確認した。

An Instructional Method for the Remote MR Collaboration on the Basis of Viewpoint Coordinates

YUTA OKAJIMA,^{†1} TAKESHI MATSUYAMA,^{†1}
YUICHI BANNAI^{†2} and KENICHI OKADA^{†3,†4}

Recently, some environments, that an expert engineer can instruct worker techniques and operations between remote, are needed. In this research, a subject of instruction is operation required the sight of instructor. Then, we propose “an instruction method in remote collaborative MR on the basis of viewpoint coordinates”. The instructor and the worker have their own objects, and the same size and shape 3D virtual object models appear as instruction in worker’s site. These virtual object models are set on the basis of viewpoint coordinate between remote, so the relative position of the instructor and his real objects is always correspond to the relative position of the worker and virtual object models. From virtual object models, the worker can recognize how the instructor handle and watch his object. With overlapping the objects with virtual object models, the worker can perform same operations with the

instructor while looking at instruction. Then we implied a system that actualizes the concept and evaluated it. As a result, we could measure the degree of separation and could prove that working efficiency advanced rather than usual.

1. はじめに

現在、様々な場面で、遠隔地にいる熟練した技術者からの技術伝承や、遠隔地における作業現場での作業指示が必要とされる現場が増えてきている。本研究の目的は、遠隔作業指示において、遠隔に存在する指示者と作業者がそれぞれ実物体を所有した状況で、実物体を操作している指示者の視覚情報を作業者に伝え、その操作を作業者が真似することにより、作業を習うことができる環境を構築することである。

指示者が作業者に作業を教えることを目的とする作業指示では、作業者が指示者の作業を正しく理解しながら、指示内容を再現できることが重要である。しかし従来の遠隔協調作業支援システムでは、指示を映像によって確認したり、実物体を強制同期したりする必要があったため、作業を行いながらの指示内容の理解・再現が困難であった。複合現実感技術を用いた場合では指示内容の理解・再現は可能になるが、作業者は指示者とまったく同じ空間内で作業を行う必要があるうえに、空間内の位置関係を指示者となつねに一致させなければならず、指示内容の理解・再現に時間がかかるという問題点があった。

そこで本研究では MR (Mixed Reality) 技術を用いて作業者は指示者の視覚情報を共有することで、作業内容を観察できると同時に自分の操作を行うことができる「MR 空間における視点座標を基準にした遠隔作業指示支援」を提案する。本提案では、ユーザの頭部を基準にした視点座標を利用して、指示者の視覚情報を CG で生成した実物体の仮想モデルとして、作業者空間に 3 次元的に提示する。作業者は提示された仮想モデルに自分の物体を重ね合わせることで、指示者とまったく同じ操作を再現することができるので、操作を観察し

^{†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} キヤノン株式会社

Canon Inc.

^{†3} 慶應義塾大学理工学部情報工学科

Department of Computer and Information Science, Faculty of Science and Technology, Keio University

^{†4} 独立行政法人科学技術振興機構

Japan Science and Technology Agency

ながら同時に追従することが可能となる。本手法によって実際に物を手に持って動かす作業を遠隔に伝え、その状態を共有することができるため、手に何らかのデバイスや道具を持って行う作業を遠隔から効果的に教育・支援できる環境の実現が可能である。

本稿では、この提案概念を実現するシステムを実装し、評価実験を行うことによって提案手法の有効性を確認する。

2. 遠隔協調作業支援システム

2.1 2次元情報による遠隔協調作業

遠隔地どうして協力して作業を行う初期のシステムとして、ホワイトボードやビデオデータなど2次元の情報をやりとりするシステムが研究されている¹⁾。しかしこの研究では、遠隔に伝達できる情報が2次元であるために文字などは容易に伝達できるが、ユーザや実物体の動きなどを正確に伝達・認識・再現することは非常に困難で、伝えられる情報に限度があるという問題点があった。

2.2 3次元情報による遠隔協調作業

遠隔地にいるそれぞれのユーザが各自の作業対象となる実物を所持した状況において、指示者が作業者に作業を指示したり、協調作業を行ったりする研究例がある。このような環境では、遠隔地にある実物どうしの状態をどのように共有させるかが重要な課題となる。

この課題を解決するための手法として、まず機械的な仕掛けによる実物体の状態同期があげられる²⁾⁻⁴⁾。しかしこれらの場合、実物体の動きはつねに強制的に同期されてしまうため、互いに自由に実物体を動かすことができず、ユーザの動きに大きな制約がかかってしまう。同様のものとしては近年、神徳ら⁵⁾によるロボットによる遠隔協調作業支援や後藤ら⁶⁾によるVR技術を用いた遠隔医学教育支援などの力学呈示による遠隔作業指示支援が研究されている。これらでは、作業者自身の自由度は強制同期に比べて緩和されるが、作業者の意思で作業の追従・学習を行っているわけではないため、作業者が作業を学んでいるかに疑問が残る。

別の手法としては、撮影された作業者の空間の映像をもとに状態を同期させる手法が研究されている。Kuzuokaら⁷⁾によるSharedViewでは撮影された作業者空間の映像に指示情報を加えることで、作業者の空間の情報を共有して指示を与えることができる。また鈴木ら⁸⁾は、撮影された作業者の空間の映像に対する指示手法として、AR (Augmented Reality) 技術を用いてCGで作業者側に提示する手法を実現している。しかし、これらの研究では指示対象は作業者空間の映像であるため指示者は実物体を所持しておらず、指示者も実物体

を所持して手本を見せるようなシステムは実現されていない。

また遠隔協調作業の応用として遠隔医療を取り上げる研究が多く行われてきている。伊関ら⁹⁾によるVR技術を利用した共同作業支援や末永ら¹⁰⁾によるMR技術を利用した遠隔超音波画像診断におけるプローブ操作教示システムである。これらはそれぞれに共有の工夫を行っているが、両者が実物体を持った状態では実現しておらず、正確な作業の追従が困難である。

相手の視線を理解することで、作業を理解する視線制御の研究も酒田ら¹¹⁾によって行われている。酒田らはアクティブカメラ・レーザを肩に載せ、相手の視線を表現している。しかしこの研究では、相手の作業がどのように行われているかは理解できず、相手の作業を理解して再現することは非常に困難となる。

2.3 実物体を用いたMR遠隔協調作業

我々は2.1節、2.2節であげた問題点を解消するシステムとして、MR技術を用いた実物体の状態同期を行ってきた¹²⁾。この手法では、MR技術によって指示者が行った実物体の動きを遠隔の作業者側に仮想物で提示し、作業者がその仮想物を追従して自身の実物体を動かすことで、互いに操作物体をポータブルに扱える遠隔作業指示を実現している。しかしこの手法は互いの空間の1点を基準に互いの空間や動きを共有しているため、作業者が指示者の動きと同期をとるためには、初期状態を合わせたうえで、指示者自身の動きや実物体の操作などのすべての動きに対して、つねに仮想物を追従して同期をとらなくてはならない。図1はその一例を示している。

空間Aが指示者、空間Bが作業者とする。それぞれの空間は同一の構造をしており、両空間は空間の1点を基準とした座標系で共有されている。このシステムにおいて、空間Aの指示者が何気なく円柱の物体を持ちながら、図中左の矢印のように作業位置を90度変更

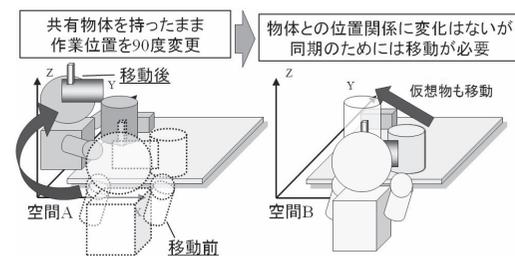


図1 空間を基準にした共有
Fig.1 Share based on the space.

したとする．このとき空間 B に表示されている仮想物の位置は，空間を基準に空間 A の実物体と共有されているため，仮想物は図中右の矢印のように動く．この動作は指示動作ではなく，ユーザと物体の位置関係も変わっていないため，作業者は作業を習うためには追従する必要がない動作である．しかし，この後も指示者の作業を追従するためには状態を一致させなければならない，このような余計な動きまでもつねに合わせていく必要がある．空間の構造においてもつねに一致させる必要がある．

そのため，作業者が指示者の作業を再現するには時間がかかるということや，両ユーザともに相手を気にしながら動かなくてはならないといった問題点があった．

3. 視点座標を基準にした遠隔 MR 作業指示

3.1 作業指示における視点共有の重要性

複数のユーザを指示者と作業者の役割に分け，指示者が作業者に作業方法を教えることを目的とする作業指示では，作業者が指示を容易に理解できる必要がある．そのような作業指示の中でも実物体を利用して行う作業指示では，実物体を用いて手本を見せることができるため，言葉だけでは指示が困難な作業の指示が期待される．本研究では，このような作業に対する作業指示を対象とする．しかし，このような作業のほとんどは技術やノウハウを必要とする熟練の作業となる．そのため，この作業を技術やノウハウを持たない作業者に教示する場合，作業者が自由な視点で作業を観察して再現することはほとんど不可能といえる．この作業指示を実現するためには，作業者に対して指示者の操作を正しく理解できる観察環境とその操作を指示と照らし合わせながら再現できる操作環境を用意する必要がある．

両ユーザが同じ空間で隣接して行う対面環境で行う作業支援においては，指示者は実際に手本を見せて作業者に教示する．このとき，指示者とまったく同じ位置から手本を見ることは物理的に不可能であるため，操作を学ぶ作業者は指示者の操作を観察するために横から覗きこんで確認する．そのために，操作部分が死角になって確認できなかったり，実物体に対する正確な角度・距離感を理解できなかったりすることがあり，作業者は正しく作業を理解できないうえに，その作業を同じように追従するのは非常に困難となる．

遠隔環境では，対面環境のような同じ場所に立えないという物理的制約は解消される．しかし，同時に指示者とその作業を視界にとらえることができなくなる．そのため何らかの手法を用いてこれらを作業者空間に表示して，作業指示を行う必要がある．しかしこれまでの研究では，2章であげたように，指示者の作業を隣接されたビデオで観察したり，実物体を強制同期させたりすることで実現されていた．そのため，ビデオによる確認では動作の再現

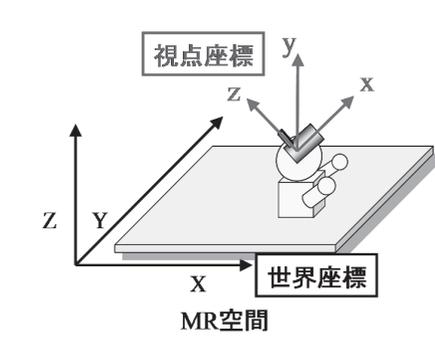


図 2 視点座標

Fig. 2 Viewpoint coordinate.

が考慮されておらず，実物体の強制同期は視点は考慮されていないというように，理解できる観察環境と再現できる操作環境の両方を持ち合わせた研究は実現されていなかった．

3.2 視点座標を基準にした遠隔作業指示手法の提案

3.1 節から，遠隔間での作業指示を実現するためには，“指示者の操作を指示者の位置から観察できる”，“指示者の操作を見ながらその操作を再現できる”という 2 つの条件が作業者空間に必要な点といえる．

そこで本稿では，これらの条件を満たす新たな遠隔作業指示手法として，「視点座標を基準にした遠隔 MR 作業指示」を提案する．視点座標とは，図 2 にあるように，MR 空間を構築しているある 1 点を基準にした静的な世界座標に加えて新たに設置した，ユーザの頭部をつねに原点に持つ動的な座標系である．ユーザが動けば位置を検出して再定義され，ユーザが首を傾ければ姿勢を検出して再定義される．これらの再定義はリアルタイムに行われる．

作業空間で作業をするユーザ（作業者）と，遠隔から作業指示をするユーザ（指示者）は同じ大きさ，形状の実物体を所持する．指示者は実際に実物体を手で動かしながら操作の例を見せ，その指示は作業者側の空間において，実物体と同じ形・同じ大きさの 3 次元 CG で生成された仮想モデルによって提示される．ここで，仮想モデルの提示する位置姿勢を，指示者空間における「指示者の頭部」と「実物体」の相対位置関係と，作業者空間における「作業者の頭部」と「仮想モデル」の相対位置関係が，一致するようにする．これにより，作業者空間に指示者の視覚情報を仮想物で提示することができる．この視覚情報によって，作業者は指示者がどのように物体を持ち，動かしているのかを容易に理解することが可能とな

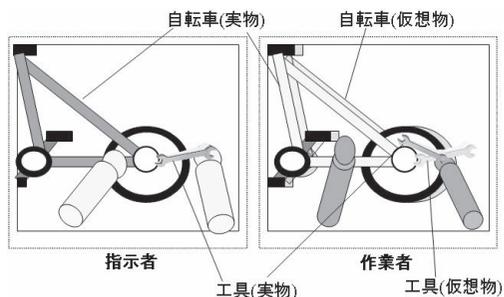


図3 利用イメージ
Fig.3 Image of use.

る。さらに作業者は、自身の前に提示された指示を、実際に実物を動かして追うことによって操作を真似ていくことで、指示者とまったく同じ操作を再現することができる。このような指示者が操作を示し、それを作業者が真似して操作を追うという手順を繰り返す作業指示支援を行っていくことで、2点の条件を満たした遠隔作業指示を実現することができる。

また作業者の行った操作も同様にして指示者空間において仮想モデルを用いて3次元的に提示されるので、指示者はリアルタイムかつ直感的なフィードバックを得ながらの支援が可能であり、作業者が正しく操作を追従したことを確認してから次の操作の指示を行うことができる。このように、遠隔間の実物体への操作の共有を行っていく。

本手法の応用対象としては、手に持って操作をする端末やタンジブルユーザインタフェース、道具、工具の使用方法に対する遠隔からの支援、トレーニングが想定できる。図3は視点座標を基準に指示を行うシステムの利用例として自転車の修理支援を想定した図である。

熟練した技術者（指示者）が技術を持たない作業者に対して、実際に工具を用いて、どのような向き・距離で作業箇所を見て、どの部分にどのような角度で工具を当てていくのかを教示する場面である。図の左側が指示者、右側が作業者の視界を示し、各自作業対象となる自転車と工具を所持している。右側の作業者空間には現実空間の映像に加えて、透過性のあるCGで作成された自転車と工具の仮想モデルが提示されている。この仮想モデルは指示者が見ている自転車と工具とつねに同じ位置姿勢に提示されているため、作業者は図のように自分の自転車を仮想モデルに重ね合わせていくことで、指示者が見ている向き・距離で自転車の作業箇所を見ることができる。そして、さらに工具を仮想モデルに追従させていくことで、どのように工具を扱えばいいか学ぶことができる。つまり技術を持っていなくても、

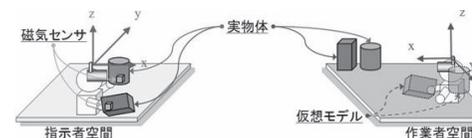


図4 仮想モデルの提示

Fig.4 Virtual object model based on viewpoint coordinate.

仮想モデルを重ね合わせるだけで、熟練した技術者の動きを再現することができる。なお、左側の指示者空間にも作業者の視界を表す仮想モデルが表示されるのだが、ユーザの役割の理解を容易にするため、本図では描写していない。

3.3 仮想モデルによる指示情報の提示方法

図4を用いて、遠隔への指示情報の伝達手法を説明する。遠隔間で指示者と作業者でそれぞれ同じ形・同じ大きさの操作対象となる実物体を所持している。実物体は円柱と、直方体である。HMD (Head Mount Display) を原点にした座標系が視点座標である。

作業者空間には、2つの実物体と同じ形・同じ大きさの3次元CGを作成する。これが指示者の実物体に対応する仮想モデルとなる。仮想モデルに透過性を持たせることで、現実空間と仮想モデルを同時に見ることが可能となる。この仮想モデルは以下の手順で提示される。

- (1) 指示者空間における実物体の位置姿勢を計測
- (2) 指示者空間における視点座標基準にした実物体の位置姿勢を作業者空間に伝達
- (3) 作業者空間の視点座標上の同位置姿勢に仮想モデルを提示

このようにして仮想モデルを指示者が見ている実物体と同じ位置関係につねに提示させる。そして、作業者はこの仮想モデルに自分の実物体を重ね合わせることで、指示者と同じ向き・距離で実物体を所持して、まったく同じ操作を行うことができる。

3.4 指示者へのフィードバック

本手法では、指示者が操作の見本を見せてそれを作業者が真似して追う、という手順を繰り返すことにより作業指示を行う。ここで、指示者空間にも作業者の所持する実物体の仮想モデルを、視点座標を基準に提示することで、指示者と作業者間で対称な空間構造を構築する。これにより、作業者が仮想モデルを利用して自身の実物体を動かすことで作業を追従できることに加え、指示者が仮想モデルの動きから作業者が作業を追従できていることを確認することも可能になる。これにより指示者は自身が指示を出しながら、作業者が指示についてきているかをリアルタイムかつ3次元的に確認することができる。

4. 実装

4.1 システム概要

本提案を実現するために、実物体の動きの伝達、共有という機能に絞ってシステムを構築した。図5に示されるように、遠隔の2地点間で通信を行うコラボレーションシステムであり、各地点でPCを1台ずつ用いた。それぞれのユーザPCには、ビデオキャプチャボードが2台搭載されており、HMDの左右のカメラからのビデオ出力がこのボードでキャプチャされ、CGと合成されてHMDに表示される。PCの仕様は、CPU: Pentium4 3.4 GHz, RAM: 1 GB, グラフィックボード: nVIDIAGeForce4, OS: Red Hat Linux9である。

システム内部はそれぞれにおいてMR空間における一般的な作業環境を構築するための「MRシステム」と、遠隔地間で実物体の変形・移動といった情報を計算し、通信をする「仮想物同期管理部」の2つのシステムからなる。MRシステムを構築する手段として、キヤノン社が開発したMR Platformを用いた。MR Platformの機能により、センサからの出力値をもとに2次元マーカによる補正を行い、仮想物体のCGの描画位置を決定する処理が行われる。MR空間を表示するデバイスとしては、両眼ビデオシースルーHMDを用いた。ビデオシースルーHMDはキヤノン社製のVH2002で、NTSCビデオカメラとVGA液晶ディスプレイが搭載されており、水平視野角は51度、本体重量は約400gである。両眼にそれぞれカメラが装着されており、それぞれの映像に対して同様にCGを反映させてユーザに出力することで、視差を考慮した立体視を実現している。このHMDには磁気センサであるFastrakのレシーバが装着されており、位置・姿勢の6自由度の値が取得できる。同期管理部に関しては、状態変化の判定、遠隔への伝達、状態の一致の3段階で構成されて

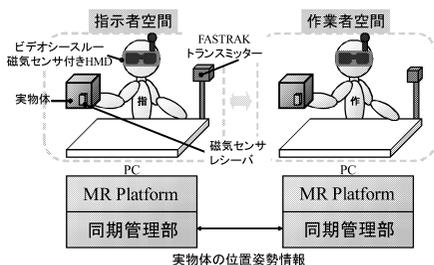


図5 システム概略図

Fig.5 System architecture.

いる。位置姿勢に変化があるかの判定は毎フレームごとに行う。フレームレートは23.3 fpsである。変化があった際には、その変化したデータの種類と数値を遠隔へ伝達する。送受信するデータは主に座標系のデータであり、伝達はあらかじめ接続済みであるソケット通信を利用して行う。なお遅延に関しては実測していないが、どのようなデータ通信の際も視認ではほとんど確認できない。またCGが複雑になるほど生成時間は長くなるが、動きの連続性に問題は見受けられない。

4.2 仮想モデル提示のための座標変換

指示者の物体の動きは作業空間において作業者の持っている物体の位置姿勢を基準に提示されるが、このときに座標変換の手順が必要となるので、図6を用いて説明する。

まず作業空間での仮想モデルの提示の仕方は、

- 指示者空間 A (空間 A) において HMD を基準とした物体の相対位置姿勢を求める
 - 求めた相対位置姿勢を作業空間 B (空間 B) へ伝達
 - 空間 B において物体と相対位置姿勢を保った状態で仮想モデルを提示する
- となる。

このとき空間 A において物体の、世界座標を基準とした位置姿勢と、HMD を基準とした位置姿勢を O_{WA} , O_{HA} とすると、それぞれは以下の同次行列で表される。

$$O_{WA} = (x_{wa}, y_{wa}, z_{wa}, 1)^T \quad (1)$$

$$O_{HA} = (x_{ma}, y_{ma}, z_{ma}, 1)^T \quad (2)$$

物体を基準とした座標系から世界座標系への変換を順方向としたとき、この順方向の変換処理は、 4×4 の同次行列で表されるモデリング行列 M_A を用いて、以下の式で表される。

$$O_{WA} = M_A O_{HA} \quad (3)$$

また逆方向の処理は M_A の逆行列 M_A^{-1} を用いて、以下のように表現する。

$$O_{HA} = M_A^{-1} O_{WA} \quad (4)$$

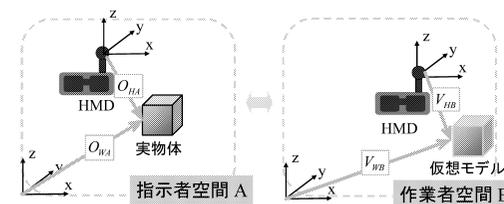


図6 物体の動きと軌跡を構成する仮想モデル提示のための座標変換

Fig.6 Change coordination for display virtual model.

そこでまず、センシングにより取得した世界座標 O_{WA} から上述の逆方向の処理によって、HMD を基準とした位置姿勢 O_{HA} を求める。

仮想モデルは空間 B において HMD との相対位置姿勢を保ったまま表示するので、 O_{HA} を代入する。

$$V_{HB} = O_{HA} \quad (5)$$

仮想物の表示は世界座標を基準に行っているため、空間 B での世界座標への変換を行う。

$$V_{WB} = M_B V_{HB} \quad (6)$$

こうして求めた世界座標の位置姿勢に仮想モデルを表示する。

5. 評価実験

本提案手法の有効性を確かめるための評価実験を行った。1 つめの実験は、指示者が遠隔の作業員に対して、実物体の表面をどのくらい細かく伝達することができるかを確かめるため、視点座標の分解度を検証した。2 つめの実験では、視点を共有する場合と共有しない場合との作業効率を比較するために、異なる 3 つの環境を設定し、同様の作業に対する比較実験を行った。

5.1 分解度の計測実験

5.1.1 実験方法

本実験では、視点座標の分解度の計測を行った。指示者と作業員はそれぞれ A5 サイズの方眼紙とポインティングデバイスを両手に所持する。指示者の方眼紙とペンデバイスには磁気センサが取り付けられており、磁気センサから位置姿勢を取得することで視点座標基準に仮想モデルを提示している。指示者は方眼紙のマスをポインティングデバイスで指し示す。それに対して、作業員は仮想モデルに自分の方眼紙を重ね合わせ、次にポインティングデバイスを重ね合わせることで、指示者と同じマスを指し示す。また、指示者と作業員ともに方眼紙は卓上に置かずにつねに空中に所持して行う。このポインティングの指示と追従を連続で 10 回行う。

方眼紙のマス目は全 7 種類で行った。10 回のポインティングを 7 種類の方眼紙でそれぞれ行い、実験にかかった時間と正解数を計測した。作業員となる被験者は男女学生 15 名で行った。図 7 は実験中の作業員の視界で、白い方眼紙とペンが作業員の実物体とポインティングデバイスを示し、透過性のあるグレーの四角い仮想モデルと黒い円錐の仮想モデルが指示者の方眼紙とペンデバイスを示している。この場面では、作業員は指示者の視覚情報を得るために、自身の実物体を仮想物に重ね合わせようとしている。作業員から見て手前に表示

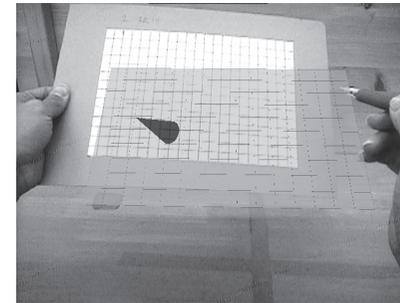


図 7 分解度実験の際の作業員の視覚
Fig. 7 Sight of subject.

表 1 実験結果の平均値
Table 1 Average score.

	マス目の数		1 辺 (mm)	作業時間 (min)	正解数
	行	列			
①	6	9	24.8	1.6	10.0
②	8	12	18.6	2.2	9.6
③	10	15	14.9	2.4	9.6
④	12	18	12.4	2.6	9.4
⑤	14	21	10.6	3.3	9.1
⑥	16	24	9.3	3.8	7.9
⑦	18	27	8.3	4.1	5.3

されている仮想の方眼紙に実物の方眼紙を重ね合わせていくことで、作業員は指示者と同様の視覚情報を獲得することができる。

5.1.2 結果と考察

表 1 に各 A5 方眼用紙における全被験者の作業の平均時間と平均正解数を示す。表 1 より、マス目の大きさが小さくなると、作業にかかる時間も増加する傾向にあることが分かる。また、正解数はマス目が 15 mm 以上の場合、マス目が小さくなくても正解数は減少せず、マス目がそれより小さくなると正解数は減少する傾向にあることが分かる。

ここで図 8 に、マス目の大きさと平均正解数・平均作業時間の分布図を示す。分布図より、ポインティングの正解率 95% 以上を求めるならばマス目の 1 辺は 15 mm 以上、正解率 90% 以上を求めるならば 10 mm 以上となることが分かる。

作業時間の増加と正解数が減少する結果の要因は、マス目が小さくなると、実物と仮想モ

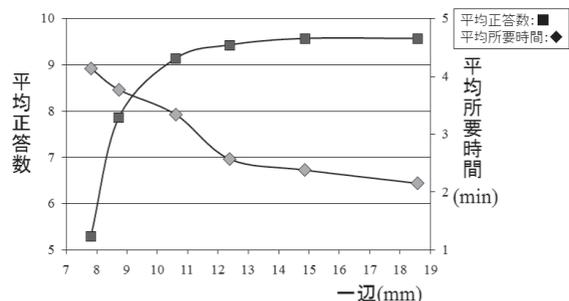


図 8 平均値のグラフ

Fig. 8 Graph of average score.

デルの重ね合わせの際に生じるズレの許容範囲が小さくなり、作業の難易度が上がるためであると考えられる。ズレの要因としては、初期状態におけるユーザの頭の位置などの環境の不一致やマス目の小ささによる難易度に加えて、作業中に起こってしまうユーザの頭のぶれ、指示者と作業者はともに実物を空中に所持していることによる手ぶれ、HMD の解像度・視野角・立体視などの性能による影響が考えられる。

5.2 指示環境の違いによる比較実験

本実験では、指示環境を視点共有の有無の違いによって分け、それぞれにおいて同一の作業を行ってもらうことで、指示環境の違いにおける作業効率の比較を行った。比較環境としては、以下の 3 つを設定した。

- 対面 MR 環境：HMD を装着した状態で指示者と作業者は隣接する。
- 世界座標基準：遠隔の作業者に仮想モデルを世界座標基準で提示する。
- 視点座標基準：遠隔の作業者に仮想モデルを視点座標基準で提示する。

「対面 MR 環境」とは、互いに HMD を装着した指示者と作業者が隣接した状態で実物体を所持して行う作業環境である。そのため、この環境における作業指示では直接指示が可能であり、仮想物を提示する必要はないが、本実験では視点共有の有無による作業効率の比較を行いたいため、対面環境においても、提案手法と同様にユーザが HMD を装着する環境を設定した。また「世界座標基準」とは 2.3 節にあげた、遠隔環境において互いの空間の 1 点を基準に互いの空間の状態を MR 技術によって共有する手法である。

これらの視点を共有しない環境と本提案手法を比較することで、視点共有の有無による作業効率の比較を行った。

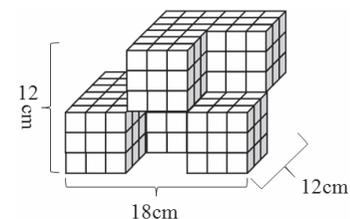


図 9 実験に用いる実物体

Fig. 9 Object for experiment.

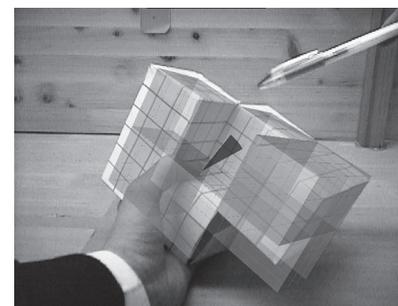


図 10 比較実験の際の作業者の視覚

Fig. 10 Sight of subject.

5.2.1 実験方法

分解度の計測実験 (5.1 節) と同様に、ポインティングの作業指示を立体を用いて行った。指示者と作業者は操作対象実物体とポインティングデバイスを両手に所持する。図 9 は操作対象物体を示す。物体の特徴は形が対称形でなく、凹凸があり、見る方向によって死角が生じるもの、そして、物体表面は 1 辺が 2 cm のマス目で区切られている。

指示者は物体を回転運動した後にデバイスを用いてマス目を指し示し、作業者は指示者と同じマス目を指し示す。また、指示者と作業者ともに操作対象物体とデバイスは卓上に置かずにつねに空中に所持して行う。

10 回のポインティングを 3 種類の環境でそれぞれ行い、実験にかかった時間と正解数を計測した。作業者となる被験者は男女学生 14 名で行った。図 10 は分解度実験と同様に、視点座標基準の実験中の作業者の視界を示している。この場面では、仮想物と実物体が重

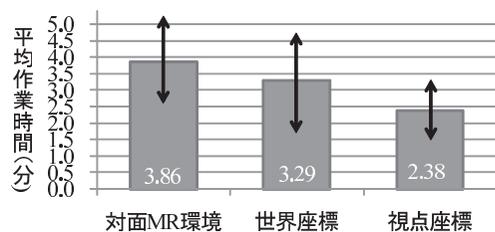


図 11 平均作業時間
Fig. 11 Average time.

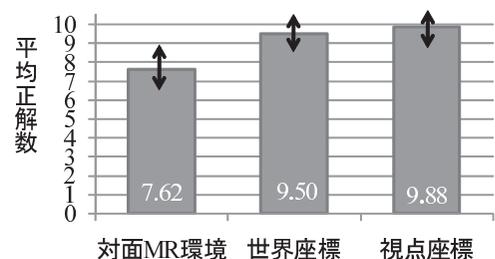


図 12 平均正解数
Fig. 12 Average score.

なっているため、作業者は指示者と同じ視覚情報が得られている。この後、さらにペンを仮想物に重ね合わせることで、ポインティングを追従する。

5.2.2 実験結果と考察

図 11 は各環境における被験者の平均作業時間を示し、矢印は標準偏差を示している。視点座標環境は 2 分 23 秒で、対面 MR 環境は 3 分 52 秒となり 2 つの間に有意差がみられた (有意水準 1%)。また世界座標環境は 3 分 17 秒で、視点座標との間に有意差がみられた (有意水準 5%)。図 12 は各環境における被験者の平均正解数を示す。視点座標環境は 9.88 で、対面 MR 環境は 7.62 となり 2 つの間に有意差がみられた (有意水準 5%)。

それぞれの要因を考察する際に、表 2 に各作業指示環境における、「作業者が、指示者の操作を見る際にポインティング箇所死角が生じるか」についてと、「作業者が、指示者と物体の位置関係を知ることができるか」についてまとめた。

対面 MR 環境では指示者と作業者が隣り合っているために、作業者が指示を観察する際に死角が生じていると考えられる。そのため、作業者は指示者の操作を見る際に自分の物

表 2 作業指示環境ごとの比較

Table 2 Difference of environments.

	対面 MR	世界座標	視点座標
死角	あり	なし	なし
作業方向	分かる	分からない	分かる

体から目を離して相手の手元を覗き込まなくてはならない。つまり対面 MR 環境における作業者は何度も指示を確認しながら操作を追従する必要があるため、作業の時間がかかり、正解数も少なくなってしまうと考えられる。世界座標基準においては、指示観察の際に死角は生じないが、作業方向を判断するものとしては、指示者のペンデバイスを示す仮想物のみであるため、見失った際には作業の追従が困難になる。そのため、仮想デバイスの検索や困難な追従に時間を要し、作業の時間が長くなったと考えられる。しかし視点座標環境であれば、つねに指示者の視覚情報を観察できるため、死角が生じる恐れも作業方向が分からない恐れもない。そのため、他の手法に比べ作業効率が高まったと考えられる。

6. おわりに

近年、様々な場面で、遠隔地にいる熟練した技術者からの技術伝承や、遠隔地における作業現場での作業指示が必要とされる現場が増えてきている。そのような作業指示の中で本研究は、物体を見る向きや距離といった指示者の視覚情報が重要な作業を研究対象として、遠隔作業指示支援を行った。そして、遠隔に存在する指示者と作業者がそれぞれ実物体を所有した状況で、実物体を操作している指示者の視覚情報を、作業者に伝え、その操作を作業者が真似することにより、作業を習うことができる環境の実現を目指した。

そこで本研究は、「視点座標を基準にした遠隔 MR 作業指示」を提案した。視点座標とは頭部 (HMD) を原点に持つ座標系であり、指示者の所持する物体の仮想モデルを作業空間で視点座標基準に提示する。本手法によって、作業者は指示者の視覚情報を共有することができるため、操作を観察すると同時に仮想モデルを重ね合わせることで操作を追従することができる。また、指示者にも同様に作業者の物体を仮想モデル提示し、フィードバックを返すことで、指示の追従ができていないか確認することができる。本システムによって細かい動作や作業を伝えたり、対面環境では相手の視点に入り込むという実現不可能な環境を実現したりすることができるので、遠隔作業指示支援としてのシステムだけでなく、作業指示の新しい手法としての可能性を持っている。

この提案システムを実装して評価実験を行った。分解度の計測実験より、視点座標基準に

して作業指示をする際の伝達できるポインティング作業のマス目の細かさを計測した。指示環境違いによる比較実験では、対面 MR 環境と従来の世界座標基準で行われていた遠隔 MR 環境よりも、作業効率の向上を確認することができた。

今後の展望としては、現在は仮想モデルが動いた際に、作業者は指示者空間において物体が動いたのか指示者が動いたのかを判断することができないので、区別できるようにしていきたい。また分解度の向上としては、手ぶれ補正や HMD 性能の向上などを行っていきたいと考えている。また現状のシステムでは、指示者と作業者の体の大きさや利き手が異なる場合に対応できないという問題点を残している。この問題点に対しては、体の大きさによる指示仮想物の拡大・縮小や鏡像の利用などの工夫を試行錯誤していくことで解決を目指す。

参 考 文 献

- 1) Watabe, K., Sakata, S., Maeno, K., Fukuoka, H. and Ohmori, T.: Distributed Multiparty Desktop Conferencing System: MERMAID, *Proc. CSCW'90*, pp.27-38 (1990).
- 2) Brave, S., Ishii, H. and Dahley, A.: Tangrible interfaces for remote collaboration and communication, *ACM CSCW'98*, pp.169-178 (1998).
- 3) Wesugi, S. and Miwa, Y.: Facilitating interconnectedness between body and space for full-bodied presence - Utilization of Video projection "Lazy Susan" communication system, *Int. Workshop on Presence (Presence2004)*, pp.208-215 (2004).
- 4) Sekiguchi, D., Inami, M., Kamakami, N. and Tachi, S.: The Design of Internet-Based RobotPHONE, *ICAT*, pp.223-228 (2004).
- 5) 神徳徹雄ほか：通信時間遅れを有する遠隔協調ロボットシステムの操作支援，第 5 回ロボティクスシンポジウム予稿集，pp.451-456 (2000).
- 6) 後藤敏之，中山裕生，近藤大祐，木島竜吾：患者モデルへの投影による医学教育支援，VRSJ 第 8 回大会論文集 (2003).
- 7) Kuzuoka, H.: Spatial Workspace Collaboration: A Shared View Video Support System for Remote Collaboration Capability, *Proc. CHI '92*, pp.533-540 (1992).
- 8) 鈴木雅史，葛岡英明，行岡哲男：遠隔医療指示支援システムの開発，VRSJ 大会論文集，Vol.5, pp.431-434 (2000).
- 9) 伊関 洋，南部恭二郎，杉浦 円，村垣善浩，川俣貴一，堀 智勝，高倉公朋：VR 技術を利用した最新の脳外科手術，バイオメカニズム学会誌，Vol.25, No.2, pp.66-70 (2001).
- 10) 末永貴俊，飯野恵秋，黒田和宏，大城 理，千原國宏：遠隔超音波画像診断におけるプロップ操作教示システム，電子情報通信学会論文誌，Vol.J83-D-II, pp.324-332 (2000).
- 11) 酒田信親，蔵田武志，興梠正克，葛岡英明，マーク・ピリングハースト：肩載せアクティブカメラ・レーザによる遠隔協調作業，マルチメディア，分散，協調とモバイル

(DICOMO) シンポジウム，pp.377-380 (2004).

- 12) 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，*VRSJ*, Vol.12, No.4, pp.529-536 (2007).
- 13) Uchiyama, S., Takemoto, K., Satoh, K., Yamamoto, H. and Tamura, H.: MR Platform: A basic body on which mixed reality applications are built, *Proc. IEEE and ACM Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2002)*, pp.246-253 (2002).

(平成 21 年 5 月 8 日受付)

(平成 21 年 10 月 2 日採録)



岡嶋 雄太

2008 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開放環境科学専攻修士課程に在学中。複合現実感を用いた遠隔協調作業の研究に従事。



松山 岳史

2009 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開放環境科学専攻修士課程に在学中。複合現実感を用いた遠隔協調作業の研究に従事。



坂内 祐一（正会員）

1978年早稲田大学工学部卒業。1980年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。1988年ミシガン州立大学コンピュータサイエンス学科修士課程修了。2007年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了。博士（工学）。1980年キャノン（株）入社。画像処理，ヒューマンインタフェース，グループウェア，複合現実感等の研究開発に従事。当学会論文誌編集委員，GN研究会幹事等を歴任。日本VR学会サイバースペース研究賞，ICAT2007最優秀論文賞，平成19年度情報処理学会論文賞を受賞。現在，日本VR学会香りと生体情報研究委員会委員長，日本VR学会会員。



岡田 謙一（フェロー）

慶應義塾大学工学部情報工学科教授，工学博士。専門は，CSCW，グループウェア，ヒューマン・コンピュータ・インタラクション。『ヒューマンコンピュータインタラクション』（オーム社），『コラボレーションとコミュニケーション』（共立出版）をはじめ著書多数。情報処理学会誌編集主査，論文誌編集主査，GW研究会主査等を歴任。現在，情報処理学会 MBL 研究会運営委員，BCC 研究グループ主査，日本 VR 学会理事，CS 研究会委員長。情報処理学会論文賞（1996年，2001年），情報処理学会 40 周年記念論文賞，日本 VR 学会サイバースペース研究賞，IEEE SAINT '04 最優秀論文賞を受賞。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。