

Refereed Conference paper

3つの異なる座標系における 実物体共有遠隔MR作業指示

松山 岳 史^{†1} 岡嶋 雄 太^{†1}
坂内 祐 一^{†2} 岡田 謙 一^{†1,†3}

遠隔コラボレーションを行う際に、MRを用いる事により遠隔のユーザがお互いに実物体を共有する事が可能となった。この遠隔MR作業支援について、世界座標系、物体座標系、視点座標系という3つの座標系による仮想物の提示手法が存在する。各座標系には利点・欠点が存在するが、統一の作業において検証されてこなかった。さらに、どの作業に対してどの座標系を用いるべきかという議論はなされてこなかった。そこで本稿では、作業支援の種類を分類し、それぞれの作業支援のときにどの座標系を用いるべきかという事をまとめる。適切な座標系の使い方を知る事で、作業時間を減らす事や正確な作業が可能となる。

Remote MR work instruction systems sharing real objects in three coordinate systems

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

In remote collaboration, we have used a system which allows remote users to share their real objects by using Mixed Reality technology. Regarding this remote collaborative MR work support system, there are three different coordinate systems, namely the world coordinate system, the object coordinate system, and the viewpoint coordinate system. Although there are certain advantages and disadvantages with respect to each coordinate system, these have not been verified in a consistent work. Moreover, conventional research has not discussed where each of these coordinate systems should be used. In this paper, we categorize the kinds of work support and summarize which coordinate system should be used for each kind of work support. Knowing the appropriate coordinate system allows us to efficiently decrease the working time and to increase the accuracy of working.

1. はじめに

近年、遠隔作業支援という一方のユーザ（指示者）が遠隔に存在するもう一方のユーザ（作業員）に作業の指示を行うというシステムに関する研究が行われている。これは指示者はプロフェッショナルで、作業員が素人のユーザであり、指示者が作業員に対して何らかの作業を教育するといった状況があげられる。この遠隔作業支援において、映像や仮想空間をネットワークを介して共有するという手法を用いるのが一般的であったが、この手法では指示者は実物体を用いる事ができないため、触覚を得て操作を行う事はできない。

そこで我々は、指示者と作業員がお互いにポータブルな実物体を持ち、複合現実感（MR）技術により指示者の所持する実物体を作業員空間において仮想物として表現する事で、触覚を得る事ができ、なおかつ指示者と作業員がお互いに自由に実物体の操作が可能な遠隔MR作業支援を用いてきた。この遠隔MR作業支援において、世界座標系、物体座標系、視点座標系の3つの異なる座標系が存在する。これらの座標系にはそれぞれに特徴があり、それぞれの座標系に向いている作業があると考えられる。しかし、どのような遠隔作業支援にどの座標系を用いるべきかという議論は行われてこなかった。

そこで本研究では、遠隔作業支援の種類を分類し、それぞれの作業支援においてどの座標系を用いるべきかという事をまとめる。そして、どの座標系を用いるべきかを検証されていない作業支援について、各座標系を切り替え、評価実験を行う事によって、3つの座標系の比較検討を行う。

2. 関連研究

2.1 遠隔作業支援

実物体への操作を遠隔にいる作業員へと伝達する遠隔作業支援においてまずはじめに登場したのが、Shared View¹⁾のように、2次元ディスプレイを用いて指示者の視点映像を作業員へと通信する事により作業支援を行うシステムである。Shared Viewでは、指示者は作業員の頭部カメラで撮影した映像に対してディスプレイ上で手を使って指示を与えるが、指

^{†1} 慶應義塾大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻
Keio University

^{†2} キヤノン株式会社
Canon Inc.

^{†3} 独立行政法人科学技術振興機構
JST

示者は実際に作業の対象となるものを所有する事ができないため、触覚を得ながらの指示を行う事はできない。また作業者はディスプレイと作業対象となる実物体を交互に見る必要があり、指示を見失う恐れがある。

そこで登場したのが、MRを用いて遠隔作業支援を実現した Lazy Susan²⁾である。このシステムでは、一方の空間でユーザがディスクを回転させると他方においても同じ回転の動きが表現されるように、同じ構造の机上面に同期回転ディスク装置を組み込んでいる。しかし、プロジェクタにより投影されたアバタと作業を交互に見なければならず、非効率である。また、作業空間は1軸の回転のみの自由度であり、基本的に固定されている。

2.2 実物体を用いた遠隔作業支援

我々は遠隔 MR 作業支援を用いる事により、2.1 で述べた問題点を解決してきた。このシステムでは、まず指示者と作業者のお互いに同型・同サイズの実物体を所有させ、MR 技術により遠隔の相手の実物体の情報を仮想物として提示する事により実現している。このシステムにより、作業者は操作対象となる実物体と、指示者からの作業指示である仮想物の動きを同時に見る事ができる。また、指示者と作業者がお互いに実物体を所有しているため指示者も触覚を得た操作が可能となる。そして、磁気センサにより実物体の位置を得る事ができるため、お互いに6自由度で実物体の操作が可能である。

この手法で遠隔間で共有を行う際に、仮想物の表示方法として3つの異なる座標系が存在する。世界座標系は空間上のある一点を基準とする空間そのものを共有する座標系であり、作業者は指示者の動きや実物体の動きを認知可能である。物体座標系³⁾は、操作対象となる実物体を基準とした座標系であり、指示者の実物体の動きは作業者には伝わらないため、指示者と作業者はお互いに自由に自分の所持する実物体を操作する事ができる。視点座標系⁴⁾は、HMDの位置姿勢を基準とした座標系であり、作業者は常に指示者の視点を得ながら作業を行う事ができる。これらの座標系にはそれぞれ利点・欠点が存在するはずだが、これらの座標系を統一の作業において使い、比較する事により体系的に各座標系の特徴をまとめる事はなされてこなかった。

統一の作業により比較を行っていないなければ、どのような特徴があるのか、あるいはこれらの特徴に差が認められるのかを知る事ができない。そのため、他の座標系を用いれば作業効率があがる場合でも、どの座標系が適切かという事を知らないために作業時間がかかってしまったり、あるいは作業の精度が落ちてしまうという状況があり、非効率である。

3. 3つの異なる座標系における遠隔作業支援

3.1 3つの異なる座標系

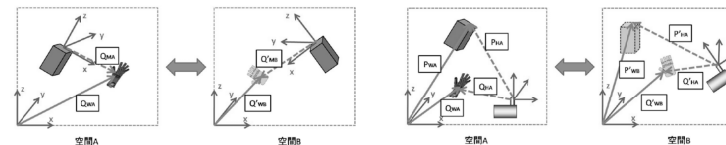


図1 物体座標系の構造

図2 視点座標系の構造

各座標系の定義及び特徴について、世界座標系・物体座標系・視点座標系の順に説明する。

世界座標系は空間上のある1点を基準に空間のそのものを共有する座標系である。そのため、作業者からすれば、あたかも同じ空間に指示者がいるかのように、指示者の実物体の動き、指示者自身の移動を認知する事が可能である。作業者が指示者の作業を追従する際には、指示者の移動が図3のように仮想物の動きにより提示されるので、まず指示者と同じ位置に作業者自身が移動し、自分の所有する実物体を仮想物の角度に回転させ、そして仮想物に自分の所有する実物体を重ね合わせる事で指示者の指示を追従する。このとき、指示者と作業者で実空間の構造を完全に一致させておかなければならない。なぜなら、作業者は作業を追従する際に指示者と同じ位置に移動をしなければならないが、同じ実空間の構造でない壁や机などの障害により作業者が移動できない場所に指示者が移動する事があるからである。また、一つの実物体の操作を行うのにわざわざ指示者と同じ位置に移動して操作を行わなければならない、非効率的である。逆に、指示者と作業者で同じ実空間の構造を実現できたときは、指示者の位置を知る事ができる唯一の座標系であり、指示者が作業者に対してどのように移動して欲しいかといったような指示を行う際に有効な座標系である。

物体座標系は指示者と作業者のそれぞれが所持している実物体に取り付けられた磁気センサの位置を基準とした座標系である。ユーザや実物体の位置は世界座標系の座標でしか検出する事ができないため、実物体を基準とした状態共有を実現するには、図1のように世界座標系から物体座標系への変換をする必要がある。このような座標変換は、平行移動と回転によって構成されている変換行列をかける事によって行う事ができる。例えば空間Aにおいて、世界座標系での実物体の位置を P_{WA} とし、物体座標系での右手の位置を Q_{MA} とす

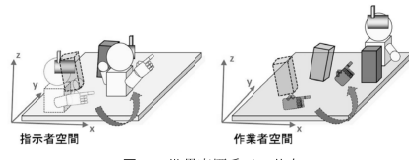


図 3 世界座標系での共有

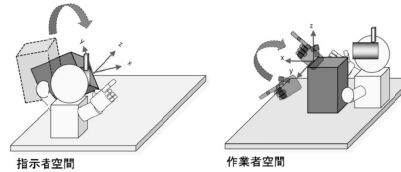


図 4 物体座標系での共有

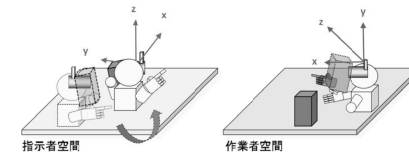


図 5 視点座標系での共有

ると、世界座標系から物体座標系への変換は、モデリング行列 M_A を用いて、

$$Q_{MA} = M_A Q_{WA}$$

で表す事が出来る。また物体座標系から世界座標系への逆変換は、モデリング行列の逆行列 M_A^{-1} を用いて、

$$Q_{WA} = M_A^{-1} Q_{MA}$$

と計算を行う事で可能である。この物体座標系により、遠隔にいる作業者が指示者の実物体からの相対位置を知る事ができる。指示者の実物体の位置を原点とっているため、図 4 のように指示者が実物体を回転させても作業者には実物体の動きが伝わらないが、指示者の手の位置が作業者の実物体を基準に回転したように見えるので、作業者からすれば指示者が回転移動したのか、あるいは実物体を回転したのかのどちらなのかを判断する事はできない。また指示者が実物体を持ったまま移動しても、指示者と実物体の相対位置が変化しない限りは作業者空間では何も変化がおきない。従って、実物体をどのように動かすかという事が重要な作業を行う際には、物体座標は不向きである。逆に物体座標の利点は、指示者の実物体の位置に合わせて実物体を移動させる必要がないため、作業者は自分の好きな位置に実物体を移動させて作業を行う事ができるという事である。そのため、実物体の形を変形させるような作業支援を行う際に有効である。

視点座標系はそれぞれのユーザが装着している HMD に搭載されたセンサを基準にした座標系である。視点座標を実現するには物体座標系と同様に図 2 のように座標変換を行わなければならない。すなわち、空間 A における世界座標系から視点座標系への座標変換し、空間 A における実物体の相対位置を空間 B へ通信し、空間 B における視点座標系から世界座標系に座標変換するという手順で計算される。この視点座標により、作業者に指示者の視覚情報を提示する事ができる。作業者が指示者の指示を追従する際には、まず仮想物を見る事で指示者が現在どのように実物体を持っていて、どの角度から実物体を見ているかとい

た視覚情報を得る事ができるので、自分の所持する実物体を仮想物に重ね合わせる事によって指示者と全く同じように実物体を所持し、見る事ができる。また、指示者の視点を常に得られるので指示者の作業を見失う恐れがない。そのため視点座標系においては、物体を見る向きや距離間が重要であり指示者と同じ視点で行う作業に適している。一方、図 5 のように指示者が実物体を同じ姿勢で持ったまま移動を行ったとしても、作業者空間には何の変化も生じない。そのためユーザがどのような移動をするかという事が重要な作業には適切でない。

3.2 一般的な状況における各座標系の比較

この節では一般的な作業支援の分類を行い、それぞれの作業支援に適した座標系の用い方を述べる。物体座標では実物体の動きが伝達されず、また視点座標においては指示者の移動が伝達されない。この「指示者の移動」と「実物体の動き」を基に、実物体を用いた操作を遠隔の相手に教育するといった類の作業支援の種類を分類していく。このとき、実物体を用いて遠隔作業支援を行う上で「実物体を動かさず」に作業を行うといった状況は考えにくいので、今回「指示者の移動」を基に全ての遠隔作業支援について以下のように分類を行う。

- (1) 指示者が移動しない場合の作業支援
- (2) 指示者が移動し、かつその移動を作業者に伝達する必要がある作業支援
- (3) 指示者が移動するが、作業者は指示者の移動を追従する必要がない場合の作業支援

まず一つ目の作業支援に関しては、従来研究の作業支援がこの類の作業支援であるといえる。すなわち、例えば箱の蓋や引き出しを空けたり閉めたりするといったように実物体を変形させる時には物体座標系が適しており、また伝統工芸技術の伝承のように物体を見る向きや距離間が重要であり指示者と同じ視点で行う作業には視点座標系が適している。

次に二つ目の作業支援とは、例えば扇子を動かしながら行う日本舞踊の教育を行うといったように、体を動かしながら実物体を扱う操作を指示する場合である。このような作業支援を行う場合には、物体座標系や視点座標系では作業者の移動を正確に伝達する事は

不可能であり、世界座標系を用いなければならない。

最後に3つ目の作業支援についてであるが、実物体への操作を行う際に、指示者の動きや物体を動きを真似る必要がない作業であっても、指示者は移動しながら、かつ実物体を動かしながら操作を行いたいという状況が存在する。例えば、指示者が携帯電話の操作方法を遠隔に指示する際に、携帯電話を自分の操作しやすいように持ち方を変えながら、またどこかへ移動しながらでも行いたいという状況が想定できる。このとき作業者は指示者の携帯電話の移動であったり、指示者の移動というのは必ずしも認知する必要はなく、携帯電話のどこかのボタンを押えているのかという事さえ知る事ができれば指示者の操作を追従する事が可能である。このような状況において、各座標系を用いて遠隔作業支援を行った時、作業時間や作業の正確さといった項目に対してどのような結果が生じるであろうか。指示者が動くという状況での作業支援は従来研究にはない点であり、この3つ目の作業支援に関しては詳細に述べる。まず世界座標系では、この指示者の移動も指示者の実物体の移動も追従する必要がない作業であっても、作業者は指示者の移動や実物体の移動を全て追従した後に実物体への操作を行わなければならない。このことから、作業時間に関しては大きくなってしまうと予想できる。一方作業の正確さに関しては、指示者の全ての動きが認知可能であり、混乱が生じる恐れが少ないために、正確な作業をする事ができるのではないだろうかと推定できる。物体座標系では、指示者が実物体を移動させても作業者にはその移動が伝わらない。また、指示者が実物体を回転させると、作業者には指示者の手の位置が自分の実物体を基準に回転したように見えるので、指示者が回転移動したのか実物体を回転させたのかを判別する事はできないが、指示者が実物体のどこの位置を押えているかは認知可能である。指示者の実物体の移動を知る事ができないために、作業者は作業を追従する際に実物体を持ち変えたり、混乱する場合が生じるため、作業時間がかかるとも考えられるが、自分の操作しやすい方法で操作が可能であるために作業時間が短くなるとも考えられる。そこで、ここでは世界座標系よりは作業時間が短くなると予想しておく。一方、作業の正確さに関しては、自分で見やすい位置に実物体を回転させて様々な角度から指示者の指示を見る事ができるため、世界座標よりも高くなると予想できる。視点座標系では、作業者は指示者の実物体の移動は認知できるが、指示者の動きは伝わらないため、指示者が移動しながら作業を行ったとしても、作業者は立ち止まったまま指示の追従が可能である。また、作業者は常に指示者の視点が見られ、指示者が実物体のどこの位置を押えているかという事を、作業者は自分が動く事も実物体を動かす事もせずに常に見る事ができる。そのため、作業時間に関しては早くなると考えられる。一方作業の正確さにおいては、常に指示者と同じ視点に固定され、物体

座標系と異なり自分の好きな視点で見る事が様々な角度から作業を見る事ができないため、低くなると考えられる。以上の見解をまとめると、作業時間に関しては、早い順に視点座標、物体座標、世界座標となり、正答率に関しては高い順に物体座標、世界座標、視点座標という結果になると予想できる。そこで今回3つの座標系を切り替える事ができる環境を実装し、評価実験を行う事で実際にどのような結果となるのかを確認する。

4. システム構成

ビデオスルー HMD はキヤノン社製の VH-2002 を用いている。この HMD は 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 450g である。また HMD、実物体、手の甲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 自由度の値を取得する MR Platform⁵⁾ の機能によりセンサからの出力値をもとに仮想実物体の CG の描画位置を決定する処理が行われる。作業対象物はこのレシーバによって位置検出が行われる。HMD 位置の姿勢については、磁気センサ出力値をもとに、さらに色マーカーにより補正される。作業対象物、手の位置は磁気センサ出力値をもとに、2 次元マーカーにより補正される。図 6 に MR Platform の概略を示す。

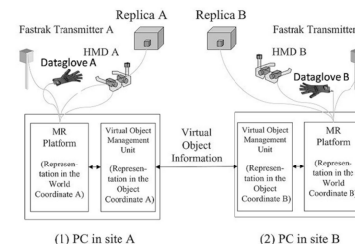


図 6 プロトタイプシステム

5. 評価実験

5.1 実験内容

世界座標系、物体座標系、視点座標系の3つの座標系を体系的に比較を行う為に、3つの座

標系において同一の作業を行い、評価を行う必要がある。今回は実物体への指差しという作業を、指示者が回転し、なおかつ実物体を回転させながら行いその指差しの操作を作業者が追従する事とする。このとき、作業者は必ずしも指示者と同じように実物体を回転させたり、指示者と同じ向きを向くように回転する必要はなく、あくまで指示者と同じ位置に指差しを行えばよい。指示者が10回連続で指差しを行ったときに、作業者が指示者の指示を追従するのにかかった10回の合計時間と、10回中何回指示者と同じ位置を指差し事ができたという割合（正答率）を測定し、3つの座標系において合計時間と正答率がどのような関係になるのか比較検討を行う。

実物体として、図7にあるように死角が存在する非対称的な立体を用いる。この立体にはそれぞれの面に1~17までの数字が書かれており、指示者はこの数字のいずれかを指し示すので、作業者は仮想物の動きを見る事により指示者がどの数字を指し示したのかを判断し、指示者の指示を追従する事になる。

それでは実験の手順について、まずは世界座標系の場合から説明を行う。最初指示者と作業者は実物体を同じ位置、同じ角度で左手で持っている。次に、指示者の「はじめ」の合図で、指示者自身が回転しながら指示者は実物体を回転させ、この瞬間に時間の測定を開始する。そして、右手の人差し指により実物体のいずれかの数字を指さす。このとき、作業者は図のように指示者の実物体と右手の動きを仮想物の動きにより確認できるので、まず指示者と同じ位置・同角度に実物体を移動させ、指示者と同じ位置に右手の人差し指で指差し、その数字を声に出して指示者に伝える。これで10回連続のうちの1回の作業が終了となり、指示者は作業者から声を聞くと次の作業を行う事となる。図8のように物体座標系、視点座標系においても指示者の動きは同じであり、それぞれの座標系により提示された仮想物の動きにより指示者の指差しの位置を判別する。

5.2 実験結果と考察

実験は18組の指示者と作業者のペアで行い、それぞれのペアに世界座標系、物体座標系、視点座標系の3つの座標系をランダムな順番で行ってもらった。被験者には作業者の役割を担ってもらい、20代の男女で行った。指示者は18組とも同じ人が行った。

図9が示すように、世界座標系では89.3秒、物体座標系では68.9秒、視点座標系では61.8秒となった。また、有意水準5%で世界座標系と視点座標系の間に差がある事が認められた。視点座標系が世界座標系よりも短くなるというのは、3.2において予想した通りの結果である。世界座標系において作業時間が大きくなった要因としては、指示者の移動にあわせて自分自身が動かなくてはならないために時間がかかった事が考えられる。また、別の要因

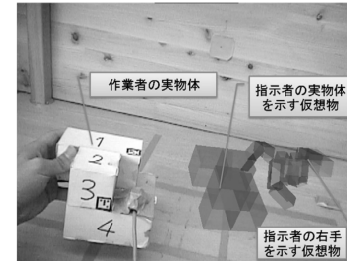


図7 世界座標系での作業者の視点

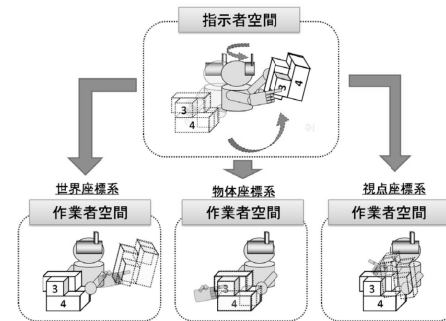


図8 各座標系における仮想物提示の違い

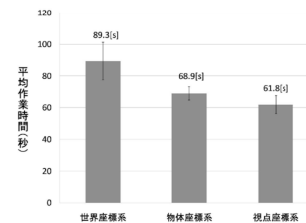


図9 平均作業時間

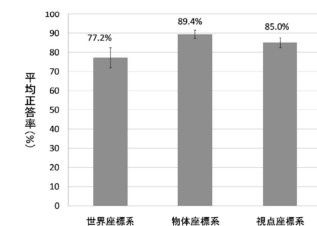


図10 平均正答率

としては、世界座標系では指示者の実物体の動きを見失う事があり、一度実物体を見失うと実物体が複雑な形をしているためにどのように実物体を回転させればよいのかという事を思考しなければならぬため、これに時間が生じ、差が出たのだと考えられる。また視点座標系において作業時間が短くなった要因としては、作業者は指示者の回転に合わせて移動する必要がなく、また目の前の仮想物の動きと同じように自分の所持する実物体を回転させればよいため直感的である。さらに、指示者の実物体を見失う事がないという事も作業時間短縮の要因としてあげられる。

正答率の結果は図 10 が示すように、世界座標系では 77.2%、物体座標系では 89.4%、視点座標系では 85.0% となった。また、有意水準 5% で世界座標系と物体座標系の間に差がある事が認められた。世界座標系と視点座標系、視点座標系と物体座標系の間には有意差がなかった。物体座標が世界座標系よりも高くなり、物体座標の正答率が高いのは 3.3 において予想した通りであるが、世界座標の正答率が低いというのは予想とは異なっている。物体座標系で正答率が高かったのは、作業者は自分の実物体を自由に動かす事により、指示者の指差しを自分の見たい視点で見ることが可能であり、また様々な角度からどの面を指差ししているかを見る事ができた事が要因だと考えられる。一方世界座標に関しては、実験前の予想では、指示者の動きも実物体の動きも両方とも知る事ができるため混乱する恐れがないため、高い正答率が得られると考えていた。しかし、実際に実験を行ってみると、作業者は指示者の実物体の動きを見失う事があり、一度実物体を見失うと実物体が複雑な形をしているためにどのように実物体を回転させればよいのかという判断が難しく、指示者とは異なる方向に実物体を回転させてしまったために作業を誤ってしまったというケースが多かった。このため、世界座標系において正答率が低いという結果となった。

これらの実験結果から言える事は、何を重要とする作業かによって物体座標系もしくは視点座標系を使い分けるべきだという事である。正確に操作を伝えなければならない作業では物体座標系を利用すべきであるし、多少誤りが生じても作業時間を短くしたいという状況では視点座標を利用すべきだと考えられる。そして作業時間も正答率が両方とも求められる状況における最適な方法は、座標系を切り替えて利用、すなわち最初視点座標でおおよその位置を合わせ、次に物体座標により自分の好きな角度から手の位置を確認する事により最も早く正確な作業を行う事ができるのではないだろうか。

6. おわりに

本稿では、3つの異なる座標系における遠隔 MR 作業支援を比較検討した。すなわち、作

業支援の種類を以下のように分類し、それぞれの作業支援においてどの座標系を利用すべきかという事をまとめた。

- (1) 指示者が移動しない場合の作業支援
- (2) 指示者が移動し、かつその移動を作業者に伝達する必要がある作業支援
- (3) 指示者が移動するが、作業者は指示者の移動を追従する必要がない場合の作業支援

1つ目の作業支援では、実物体を変形させるような作業を行う時には物体座標系が有効であり、また指示者と同じ視点で見て行わなければならない作業には視点座標系が適している。

2つ目の作業支援では、世界座標系が唯一指示者の移動を作業者に伝達することができる座標系であり、世界座標系を利用すべきである。

3つ目の作業支援について、各座標系において作業時間と正答率に関しての評価実験を行った。その結果、作業時間に関しては視点座標系、正答率に関しては物体座標系が優れているという事が示された。この事から作業によって向いている座標系が異なり、正確に操作を伝えなければならない作業においては物体座標系を利用すべきであるし、作業時間を短くしたいという状況においては視点座標を利用すべきだと考えられる。そして作業時間も正答率が両方とも求められる状況における最適な方法は、座標系を切り替えて利用する手法、すなわち最初視点座標でおおよその位置を合わせ、次に物体座標により自分の好きな角度から手の位置を確認するという方法だろう。

参考文献

- 1) H. Kuzuoka. Spatial workspace collaboration: A shared view video support system for remote collaboration capability. *Proc. of CHI '02*, pp.533-540 (2002).
- 2) S. Wesugi and Y. Miwa. Lazy susan: Communication system for remote, spatial and physical collaborative works. *Tabletop '06*, pp.35-42 (2006).
- 3) H. Tamaki, Y. Bannai, Y. Suzuki, H. Shigeno, and K. Okada. Remote Collaboration Based on Portable Object in Mixed Reality. *Proc. The Second International Conference on Collaboration Technologies*, pp.84-89 (2006).
- 4) 阿嶋雄太, 山本峻, 坂内祐一, 岡田謙一. 相手の視覚情報を複合現実感技術により取得する遠隔作業支援の提案. *MVE2008*, pp.37-42, (2008年10月).
- 5) S. Uchiyama, K. Takemoto, K. Satoh, H. Yamamoto, and H. Tamura. : Mr platform: A basic body on which mixed reality applications are built, *IEEE and ACM Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2002)*, pp. 246-253 (2002).