

異なる空間への指示行為が可能な 仮想の影による道具インタフェースの開発

渡辺 貴文[†] 上杉 繁^{††} 三輪 敬之^{††}

本研究では、遠隔の異なるテーブル上の多様な個物を 3 次的に双方で互いに指示し合うことが可能な、対面型の空間共有システムの実現を目的とした。そのためには自身の身体、相手の身体、そして個物との空間的な位置関係を整合化し、それらの関係を少なくとも視覚的に表現する必要がある。これを実現するために、双方の空間で共有された道具による指示という方針を提案し、把持したグリップの真下から棒状の道具の映像を整合的に接続することにより、その映像が相手のテーブル上の個物にまで連続的に伸張するインタフェースを開発した。また、遠隔のテーブルの映像を投影するスクリーンを自身のテーブル端に斜めに傾けて配置し、その斜め上方からテーブル上の空間を撮影することによって双方のテーブルを視覚的に統合し、一続きのテーブルとする表現手法を考案した。インタラクション実験の結果、異なるテーブルが 1 つのテーブルとして共有され、テーブル上の任意の位置の個物に対し、水平方向だけでなく高さ方向をもとめた指示を双方向で行うこと、さらには道具の映像を影のように表現することで、把持したグリップと道具の映像との分離感が軽減されることなどが示された。以上から遠隔地間での共同作業における指示行為の可能性をより広げ、自身と相手の映像空間において操作可能な映像の道具の有効性を示した。

Virtual Extensible Tool Utilizing Virtual Shadow to Support Remote Instruction on a Shared Tabletop

TAKABUMI WATANABE,[†] SHIGERU WESUGI^{††} and YOSHIYUKI MIWA^{††}

The goal of this study is to support a shared-space communication including remote instruction with physical objects. Therefore, consistent spatial relationships among positions of instructor, partner and physical objects should be expressed visually. Authors proposed a novel remote instruction method utilizing a shared tool on each tabletop. Based on this idea, a virtual extensible tool was developed by superimposing a virtual shadow, generated by a computer, onto the real shadow of the tool consistently. Moreover, a virtual face-to-face display was developed to bridge over remote two tabletops visually. The front screen is installed asloped on a table, and on the screen video image of a remote tabletop and people around the table is projected to connect each tableside visually and consistently. Experiments on remote instructions with physical objects demonstrated that people can view remote tabletop and point to a remote physical object in three dimensions, and that multiple people also can move around the table. Moreover, the results indicate that people felt as if they operate a long tool. Consequently, our method of utilizing a shared tool is available to support a shared-space communication with three dimensional interactions.

1. はじめに

情報通信技術の発達にともない、互いが地理的に離れていながらもいつでも、どこでも音声や映像などの情報を伝え合うことが可能になった。一方、単に相手の映像を見せ合うだけでは、相手の志向が読み取りに

くく、共同作業においては誤解が生じることが報告されている^{1),2)}。そこで、双方に共通の空間を生成し、視線や指示などの身体行為を遠隔地で共有する空間共有技術が登場している^{3),4)}。本研究ではこのような身体行為の中でも、共同作業において必要不可欠な行為の 1 つである指示行為に着目し、自分や相手のテーブル上にある模型などの実体の個物に対する指示行為の共有という問題に取り組むことにした。

指示行為を遠隔地間で共有するためには自身や相手の身体の位置と個物の位置との間において、空間的に整合した関係をつくる必要がある。そのため、従来手

[†] 早稲田大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Waseda University

^{††} 早稲田大学理工学術院
Faculty of Science and Engineering, Waseda University

法においては作業空間をテーブル上の2次元平面に限定すること³⁾や、一方の空間のみに作業を限定すること^{5),6)}など、身体と個物の関係を空間において制約する方針が進められてきた。したがって、3次元的な視点や指示などの自由度の高い空間性や、それぞれの空間を対等につなぐ双方向性を実現する方法は発展途上である。

一方本研究では、この空間性と双方向性の問題の解決をめざし、従来のような空間を限定する方針ではなく、それぞれの空間において操作している道具をそのまま相手の空間にまで伸ばすことで、異なる空間への指示行為を支援する方法を提案する。

そこで、自身が手に持つ棒に映像の棒を重畳し、その映像が自身のテーブルから相手の映像のテーブル空間にまで連続的に伸張するインタフェースを開発したので以下に報告する。

2. 設計指針

2.1 空間共有技術における指示行為の共有

一方の空間のみを作業空間とする、HMD⁶⁾や遠隔操作ロボット⁵⁾を利用する場合については双方向性を満たさないことから本論文では対象とせず、離れた相手の空間を映像空間として双方で共有する技術に着目し、空間性や双方向性という点において検討する。

これまでに提案された映像空間を共有する技術は主に図1の4つのタイプに分類することができる。

①のビデオ型^{7),8)}は一般的なビデオ会議システムや、メディアスペースにおける空間の共有方法であり、自身の空間において、相手の空間の映像をモニターやスクリーンに表現する方法である。この方法では、対話相手の表情や、相手がいる空間の状況を見ることが可能である。

②のテーブル共有型³⁾は、双方で同じテーブルを共有しているという状況をあらかじめ設定し、1つのテーブル上で互いの身体の位置関係を固定して映像を表現する方法であり、視線の一致や、相手のテーブル上面の個物への2次元的な指示などの支援を可能にしている。

③のボード対面型⁴⁾は、双方が共通のボードをはさんで向かい合っている状況を再現し、ボード面上での共同作業を可能にする方法である。

④のミラー型⁹⁾は、鏡のメタファを利用し、映像空間中に相手と自身の自己像や背景を鏡写しで同時に合成表現する方法である。

身体行為の空間的な表現という点からまとめると、①の手法においては視線や指示行為などの空間的な方向を正確に共有できないと報告されている^{1),2)}。こ

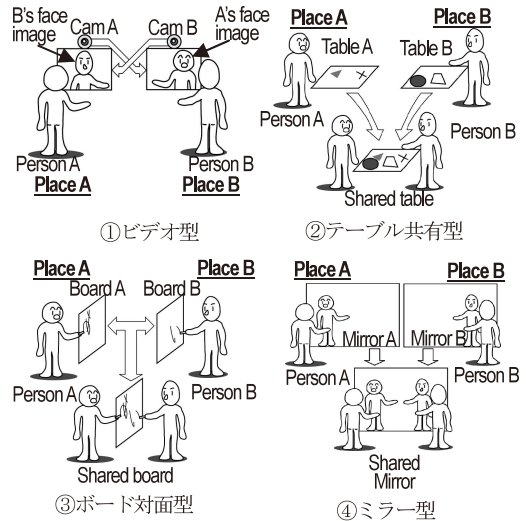


図1 空間共有方法の分類

Fig. 1 Classification of methods sharing remote spaces.

の問題を解決するため、②、③のように、あらかじめ定められた作業空間において、相手の空間の映像を自身の空間に重畳して表示し、限定された範囲で互いの身体や個物の配置を共有する手法や、あるいは④のように映像空間中の自己像を介して相手の身体との位置関係や身体行為を共有する手法が提案されてきた。

このように従来手法では、相手の実空間の個物に対する双方向で高さ方向を含んだ指示行為を、共通の映像空間における互いのインタラクションとして表現し、それぞれの空間に反映するのに対して、自身がそのまま相手の空間と対面しているような状況で共有する手法は実現できていない。

一方著者らは、双方で操作が可能な回転ディスク型の道具を組み込むことで、身体で直に触れることのできない相手の個物の位置を、直接変化させて指示をするなど、インタラクションの幅を広げる方法を提案している¹⁰⁾。

以上をふまえ本研究では、図2に示すように、離れたテーブル上の空間を接合し、道具を利用して身体行為を共有する方法を新たに提案する。

2.2 仮想道具インタフェースシステム

2.2.1 空間接合ディスプレイ

遠隔の異なるテーブル間で、個物への高さ方向をともなった双方向での指示を実現するためには、少なくとも、自分と相手のテーブル上にある個物の高さを把握できること、自身や相手の身体位置を作業空間に対し適切に表現すること、またこれらを双方で同様に表現することが必要である。さらに、道具を双方で共有することを考慮すると、双方の空間を連続的に表現す

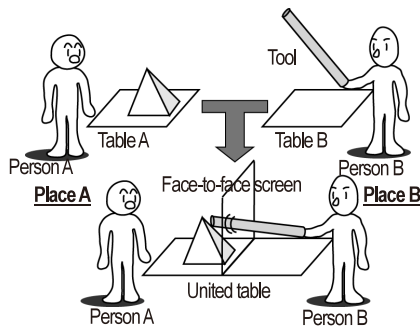


図 2 道具の利用による異なる空間の共有手法

Fig. 2 A method for bridging over remote places by utilizing tool.

る必要もある。

以上をふまえ、図 2 で示したように、遠隔の異なるテーブルどうしが対面スクリーンを介して接続して大きなテーブル面を生成し、このテーブルを挟んで参加者が向かい合う状況を想定する。

対面状況を想定した空間共有手法は、先にあげたように数多く提案されている^{3),4),7),8)}。一方で、本研究で提案する手法を実現するには、いくつかの技術的な課題がある。たとえばテレビ会議システム^{7),8)}においては、身体映像を正面からカメラで撮影する際、カメラの視野にスクリーンが干渉してしまうので、対面スクリーンに穴を開けるか、あるいは透過型のスクリーンを利用しなければならない。しかし、この手法では、視野角の関係から、身体の前に配置されたテーブル上の領域を撮影することは困難である。この問題を解決するため AGORA³⁾ などではテーブル面の映像を別のカメラで上方から撮影し、双方のテーブル上に提示しているが、テーブル上にある個物の高さを正確に表現することは困難である。本研究ではこれらの問題を解決し、あたかも双方のテーブルが接合したかのような表現を考案する。

2.2.2 仮想道具インタフェース

次に双方で指示を行う道具の表現手法について述べる。相手の実空間にある個物へ指示を行う技術として、レーザポインタを利用する方法があげられる¹¹⁾。この手法は相手の空間においてレーザポインタを移動可能な台車に設置し、遠隔から相手の空間をモニターを通して見ながら、台車とポインタの位置、姿勢を操作し、個物への指示を行うものである。またマスタスレーブ型のロボットを用いて遠隔の個物への指示や共同作業を行うシステムも提案されている⁵⁾。

一方、レーザポインタのような指示者の身体とポインタとが空間的に分離した表現は、複数人同士のイン

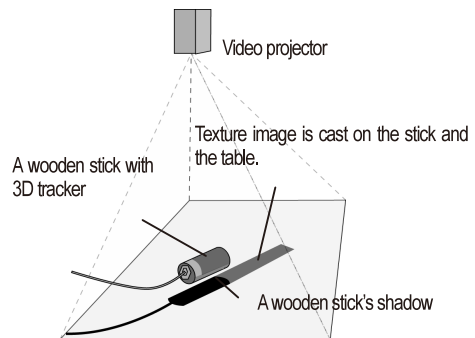


図 3 仮想道具インタフェース

Fig. 3 A virtual tool interface system.

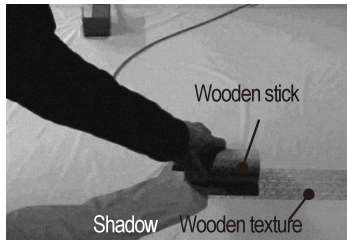
タラクションまで視野に入れた場合、指図される側にとってはだれがどこをさしているかの把握が難しい。また、マスタスレーブ型のロボットを用いたシステムにおいては、スレーブ側のロボットにマスタ操作者の顔や身体映像を投影することで、だれが指示などの作業を行ったか明示的に知ることが可能であるが¹²⁾、操作者を相手の空間に没入させる表現であるから、双方の空間を作業空間にしたインタラクションは原理的に困難である。

以上をふまえ、自身の指や手で直接指示するかのように、操作している道具がそのまま相手の空間にまで届くようなインタラクションの支援を目指す。そこで、把持した棒に映像の棒を連続的に接続し、遠隔の映像中のテーブル上の個物への指示を行う方法を提案する。2.1 節で述べたように HMD を使用しないことから、図 3 に示すように映像表現する道具の伸張部分を、把持した棒のすぐ下のテーブル面にプロジェクタで直接投影する方法を考案した。このインタフェースのことを本論文では仮想道具インタフェースと呼ぶことにする。

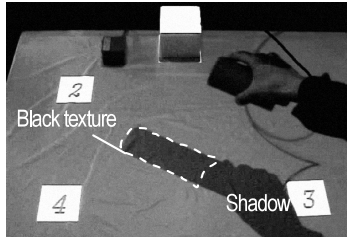
提案する道具の表現では、把持した棒をテーブル面から持ち上げると、把持した棒と映像で表現した棒の伸張部分とが幾何的に分離してしまい、使用者において違和感や分離感が生じることが予想される。

そこで、このような分離感や違和感への影響を検討するため、自身の場所のみの仮想道具インタフェースシステムを構築し、予備実験を行った。なお、この道具映像を投影するシステムやアルゴリズムについては、3 章で述べる空間共有システムへ拡張したものと同様である。

投影する映像の表現として、木製の棒にあわせた木のテクスチャからなる仮想棒と、単なる黒い仮想棒の 2 つの表現を実装し、操作感や把持した感覚の違いについて検討した。なお被験者 6 名（理系学生、21–24 歳、



(a) 木のテクスチャを投影した表現



(b) 黒い仮想棒を投影する表現

図 4 棒へテクスチャ映像を投影した様子

Fig. 4 A scene that texture is cast over the stick.

男性)にそれぞれの表現下でおよそ2分間自由に棒を操作してもらい、終了後にコメント調査を行った。実験中の様子を図4に示す。

木のテクスチャを投影した場合(図4(a)), テーブル面上で棒を操作しているときには、棒と連続してテーブル上に木のテクスチャが投影され、黒い仮想棒を投影した場合(図4(b)), テーブル上から離して棒を操作したときに、実際の棒の影と黒い映像が連続して表現された。

実験の結果、木のテクスチャを投影した場合においては、棒を持ち上げた際に、仮想棒と実体の棒との間における違和感や分離感が生じると、ほとんどの参加者が指摘した。

一方、黒い仮想棒を投影する表現においては、先の木のテクスチャを投影したときのような違和感は特に報告されず、長い棒の影がテーブル上に投影されたような感覚や、一部の参加者はあたかも長い棒を持っている感覚がするなどと報告した。

これらの結果により、把持した木の実際の影と黒い映像を連続して表現する仮想道具インタフェースの映像表現により、あたかも影のように感じることで単に違和感や分離感が軽減されるだけでなく、長い棒を持っているかのような把持感を創出する可能性を見出した。この表現を以下仮想影と呼ぶ。以上をふまえて本研究では図5のように仮想道具インタフェースの仮想棒の部分を仮想影で表現することにした。

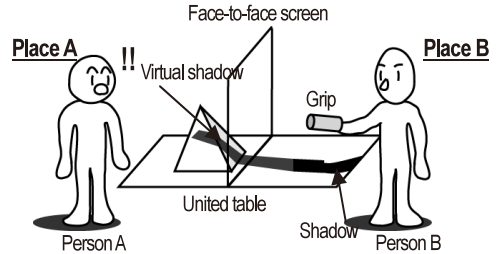


図 5 仮想影を利用した仮想道具インタフェースによる相手テーブル上へのインタラクション

Fig. 5 Interaction with a remote tabletop by utilizing a virtual tool interface with virtual shadow.

3. システムの開発

3.1 空間接合ディスプレイの開発

空間接合ディスプレイに必要な機能を以下にあげる。

- ① 自身のテーブルと相手のテーブルとが視覚的に連続して接合
- ② テーブル上の高さを有する個物やテーブルの周囲の参加者の撮影と提示

これらを満たすための設計要件として、テーブル端を含むテーブル全体の映像を撮影すること、高さを有する個物の形状を撮影すること、カメラからテーブルを撮影する際、スクリーンによる視野の遮り避けること、撮影した相手のテーブルの映像を自身のテーブルから視覚的に一続きになるように投影することがあげられる。また本研究では、1台のカメラで相手のテーブル上とその周囲の相手の身体の映像を取得することにした。

これらの要件を考慮し、相手のテーブルや参加者を投影するプロジェクタとそれを映すスクリーン、そして自身のテーブルやその周囲を撮影するビデオカメラ(720×480[pixel])から構成される空間接合ディスプレイを製作した。相手の空間に自身が立ったと想定したときの目の位置に一致するように、ビデオカメラを設置し、テーブル面を斜め上方から見下ろす角度で設置する。また、対面スクリーンは水平面から40[deg]傾けて設置した。これにより、図6に示すように、従来のテーブル共有型的手法³⁾のように対面スクリーンに穴をあけてそこにカメラを設置するという手法では困難であった、相手のテーブル端まで映像が取得できる。

また、カメラの光軸とその映像が投影される対面スクリーンとがほぼ垂直の関係となるため、自身のテーブル面と相手のテーブル面が違和感なく1つのテーブル面であるかのように表現される。さらには斜めのスクリーンによって奥行き感が創出される効果も期待できる¹³⁾。ビデオカメラで撮影した映像は、相手の場所

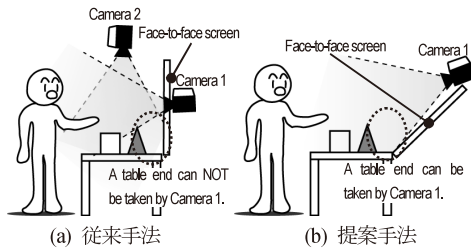


図 6 対面スクリーンを斜めにするアイデア

Fig. 6 Idea to install a face-to-face screen with a slope.

のビデオプロジェクタを用いて対面スクリーンに投影する。このとき、プロジェクタが使用者の動きを制限したり、身体やテーブル上の個物によって、対面スクリーンに投影する映像が遮られたりしないよう、鏡像反転した撮影映像を、対面スクリーンに斜め下方から背面投影する。

3.2 仮想道具インタフェースの実装

次に仮想道具インタフェースに必要な機能を以下にあげる。

- ① 自身が操作する棒の影に連続的につながる仮想影の映像のリアルタイム生成
- ② 自身のテーブル上の仮想影と、相手のテーブル上の仮想影が映像空間において連続的に接合

これらを実現するためには、自身が操作する棒の位置・姿勢をリアルタイムで計測し、この値をもとにコンピュータで仮想影を生成しなければならない。また、仮想影を提示するための映像投影も必要である。さらに、遠隔の相手のテーブルとの座標関係を定め、双方での操作する棒の位置と姿勢データを双方で共有する必要もある。

そのため、把持する木製の棒 (20×20×190 [mm]) に、6 自由度のトラッキングセンサ (Polhemus 社製 Fastrak) を取り付けた。そして棒の位置・姿勢はリアルタイムでコンピュータに送信 (RS232-C: 115,200 [bps]) する。位置・姿勢データはトランスミッタに原点をおくトランスミッタ座標系 (Ot-XtYtZt) での値であり、トランスミッタを設置したテーブルの隅を原点とした位置姿勢データである。したがって設置したプロジェクタで仮想影を投影するためには位置・姿勢データをプロジェクタの光学中心に原点を置くプロジェクタ座標系 (Op-XpYpZp) に座標変換を施す必要がある。

そしてこの座標変換された位置・姿勢データの値をもとにあらかじめモデリングしておいた、仮想影のもとになる仮想的な棒のモデリングデータに変形処理を施し、仮想影を生成する。実際には仮想影映像を生

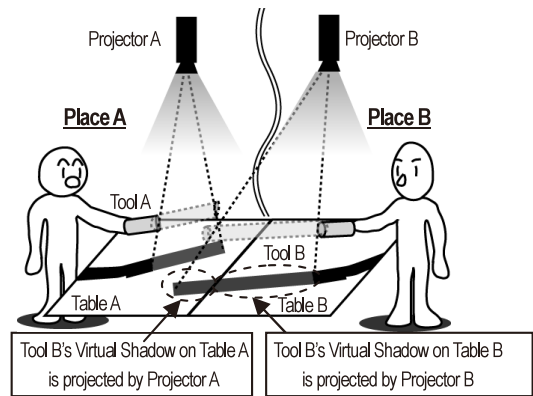


図 7 2つの場所間における仮想影の接合

Fig. 7 Connection between two virtual shadows cast on each tabletop.

成する際のビューポイントとプロジェクタの光源位置が一致しているため、プロジェクタの光学中心に原点を置く座標系において、把持する木製の棒に接合するように移動、回転した仮想の棒のモデルデータのサーフェスを黒で塗りつぶし、そのまま投影すればよい。この一連の変換を式 (1) で示す。ただし、 X_M はモデリングデータ上の頂点の位置、 M_T はトラッキングセンサのデータによってモデリングデータを移動回転するための行列、 M_P はトランスミッタ座標系からプロジェクタ座標系に変換するための行列、 X_P はプロジェクタ座標系における上のモデリングデータの頂点の位置である。

$$X_P = M_P M_T X_M \quad (1)$$

このようにして生成した仮想影はテーブル上方に設置したプロジェクタより投影する。このとき棒の位置・姿勢データは遠隔のコンピュータにも送信 (LAN: 通信速度 100 [Mbps]) する。そのコンピュータで、遠隔の相手側の空間へ延長した分の仮想影を生成し、テーブル上に投影する。ただし、自身の場所と相手の場所は光源位置が異なる。したがって相手の場所における自身の道具の仮想影を先のアルゴリズムで投影すると、相手の光源を基準にしてテーブル面に投影されるため、自身のテーブル上の仮想影とズレが生じる。そこで図 7 のように相手のテーブル上において、想定される自身の光源位置を基準に、自身の仮想の棒のモデルデータを射影変換して仮想影映像を生成し、これを相手のテーブルに投影する相手の道具の仮想影映像と重ねることにした。以上により、1 つの長い棒の仮想影が自分のテーブル上から相手のテーブル上へ連続してつながるように表現する。

空間接合ディスプレイと仮想道具インタフェースを統合したシステムの全体構成を図 8 に示す。また、空

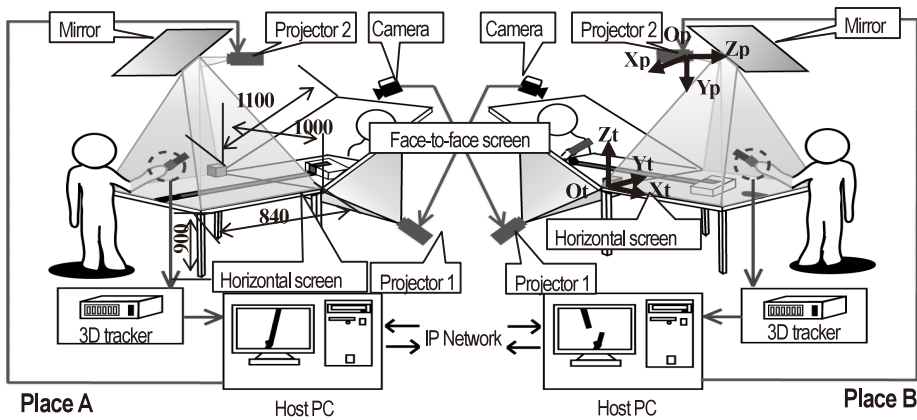


図 8 仮想道具インタフェースを活用した空間共有ディスプレイの構成

Fig. 8 Schematic diagram of shared space display utilizing virtual tool interface.

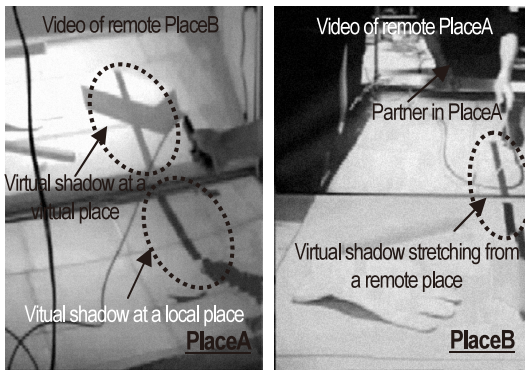


図 9 相手の空間に仮想道具インタフェースを伸張している様子
Fig. 9 A scene of a virtual tool stretching toward a remote place.

間共有ディスプレイによって双方のテーブルが視覚的に接合し、双方の参加者がテーブルを挟んで対面しているような表現と、接合されたテーブル上において仮想影を連続的に表現した様子を図 9 に示す。なお性能試験の結果、通信遅延 10 [ms] 以下、描画速度は 30 [fps]、仮想影投影最大誤差 2 [cm] 程度であることが判明した。

4. インタラクション実験

4.1 仮想道具インタフェースの表現手法

仮想影の表現における、把持した棒との接続性や操作感を検証するため、仮想道具インタフェースの表現方法について検討する。そこで、既知の間柄の被験者 6 組 12 名 (理系学生、20–24 歳、男性 11 名、女性 1 名) を対象に、次の 3 つの表現を比較する実験を行った。なお被験者は長い棒を操作する指示作業を不自由なく行える健全な被験者である。被験者は棒を操作しての自由な指示行為が可能である者を対象とし、被験者には仮



(a) 黒い棒 (b) 棒 (c) ポインタ

図 10 3 種類の仮想道具インタフェースの表現

Fig. 10 Three representations of virtual tool interface casting over the physical tool.

想影表現の名称を「黒い棒」という名称で伝えている。

条件 1 黒い棒：実体の道具の影と連続的に接続している仮想影表現 (図 10 (a))

条件 2 棒：実体の道具の影からは幾何的には連続しているが質感としては分離した表現 (図 10 (b))

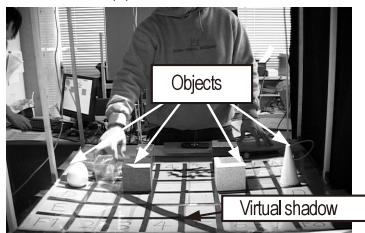
条件 3 ポインタ：レーザポインタのように実体の道具の影からは空間的に分離した表現 (図 10 (c))

なお、把持した木の棒から道具の映像表現の先端までの全長はすべての表現において 900 [mm] に設定した。また、各表現においてテクスチャや色の違いの影響を除外するために、これらの表現はすべて黒とした。

各組それぞれの被験者は離れた 2 か所に分かれ、指示される側のテーブル上は、縦 6 × 横 8 の計 48 区画に分割され、各区画には番地が割り当てられている。指示者は、どのオブジェクトをどの番地に移動するかという指示書をあらかじめ受け取っており、その指示書に従って仮想道具を用いて遠隔の相手に指示をする。そして相手 (操作者) は指示者の指示に従ってオブジェクトを別の場所に移動させる。以上の「指示 移動」課題 (図 11) を、各 3 条件においてそれぞれ 150 秒間行った。なお、実験に使用したオブジェクトは、アクリルや発泡スチロール製の立方体や円錐などの 7 個



(a) 指示者側



(b) 操作者側

図 11 仮想道具インタフェースの表現に関する実験の様子
 Fig. 11 A scene in experiment on utilizing virtual tool interface with variable representations.

表 1 仮想道具表現における評価項目

Table 1 Items of questionnaire on utilizing a virtual tool.

評価項目：指示者側
Q1.相手のテーブルに触れているように感じた
Q2.相手オブジェクトに触れているように感じた
Q3.自分の道具が相手の空間に存在する様に感じた
Q4.道具が伸びた様に感じた
評価項目：操作者側
Q5.相手の道具が自分の空間に存在する様に感じた
Q6.相手の道具が伸びてきた様に感じた

のオブジェクトである。また被験者は各条件の実験開始前に、1分程度の練習を行った。

実験中は、オブジェクトの「指示 移動」回数を計測し、終了後は、道具を操作している感覚や、自身と遠隔の相手の空間との関係に関して、表 1 に示す 6 項目を各項目 7 段階（中立 0）で評価させる主観調査を各条件で行った。さらに、どのようなインタラクションができたか、道具の操作にどのような印象を持ったのかについてのコメントを記述するように指示した。

各 3 種類の表現において、規定時間の間にオブジェクトの「指示 移動」が行われた回数について、全被験者の結果を図 12 に示す。この評価において分散分析を行ったところ、3 種類の表現において有意な差は確認できなかった。すなわち、遠隔のオブジェクトや場所を指し示し、相手に伝える効果については、3 種類の表現において同程度であるといえる。

次に、主観調査の評点の平均と標準偏差を算出した結果を図 13 に、コメント調査の結果を表 2 に示す。

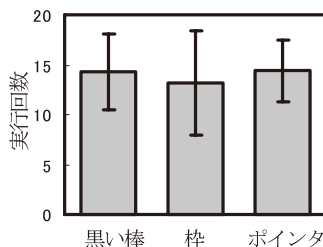


図 12 仮想道具による「指示—移動」課題の実行回数
 Fig. 12 Number of times of “instruction-movement” task by utilizing virtual tool.

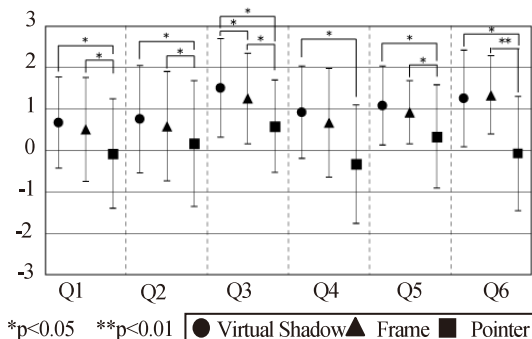


図 13 仮想道具の表現に関する評価結果

Fig. 13 Result of questionnaire on representation of virtual tool interface.

表 2 3 種類の仮想道具インタフェース表現におけるコメント調査のまとめ

Table 2 Summary of comments in three representations of virtual tool interface.

①黒い棒
<ul style="list-style-type: none"> ・指示がしやすい ・相手の空間とつながっている感じがする ・長い棒の影が投影されているように感じる ・安定感がある ・人間味を感じる ・親近感を感じる ・他の影と重なって見にくい ・単調に感じる ・距離感をつかみにくい ・相手の動きを不明瞭に感じる ・相手が指示を間違ったかどうかわかりづらい
②棒
<ul style="list-style-type: none"> ・指示がしにくい ・見やすい ・距離感をつかみにくい ・相手が指示を間違ったかどうかわかりづらい
③ポインタ
<ul style="list-style-type: none"> ・指示がしにくい ・相手側との一体感がない ・指示者とつながっている感じがしない ・相手が指示を間違ったかどうかわかりづらい ・機械的な感じがする ・道具がつながっている感じがしない

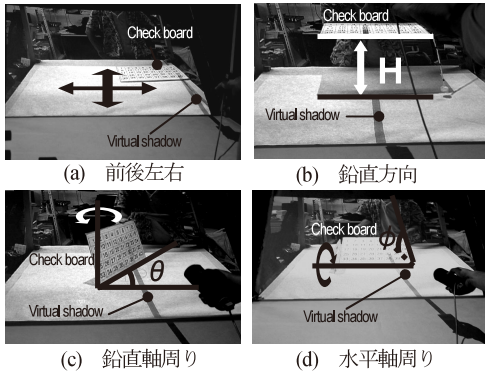


図 14 3 次元的なインタラクションの範囲に関する実験の様子
 Fig. 14 A scene in experiment on three-dimensional interaction range.

表 3 インタラクションの 3 次元範囲に関する実験結果
 Table 3 Experimental results on three-dimensional interaction range.

ボードの動かし方	指示者側	相手側
前後左右	テーブル面全体	テーブル面全体
鉛直方向 H[cm]	0~40	目線の高さまで
垂直軸周り θ [deg]	-60~60	-90~90 指示が見えるようテーブルの周りを動いた場合
水平軸周り ϕ [deg]	0~90	0~90 指示が見えるようテーブルの周りを動いた場合

なお各条件間での有意差の評価には、Wilcoxon の符号付き順位検定を適用した。

図 13 において、黒い棒の表現とポインタ表現を比較すると、すべての項目において黒い棒の方が肯定的な評価を得ており、さらに有意水準 $p < 0.05$ の有意差が示された。また、黒い棒の表現と棒表現の比較では、項目 Q3 において黒い棒の方が有意に肯定的な評価を得ていることが分かる。さらにコメント調査においては黒い棒の表現において「指示がしやすい」というような、違和感が軽減されていることが示唆されるコメントだけでなく「相手の空間とつながっている感じがする」といった相手の空間とのつながりが強まったことを示唆するコメントが報告された。

4.2 3 次元的なインタラクション範囲

次に、指示行為が共有される空間的な範囲を調査する実験を行った。A4 サイズのボードを 8×5 のマス目状に区切り、これらの区間に 1 から 40 までの数字が記入してある。このボードを相手側のテーブル上に置き、実験者が指示者に 1 から 40 までの任意の数字を指定する。指示者は伝えられた任意の数字を仮想道具インタフェースによって相手に指示する。このとき、

表 4 3 次元的な指示行為の完了時間
 Table 4 Performance time of three-dimensional directions task.

前後方向		左右方向		鉛直方向	
移動量 [cm]	完了時間 [sec]	移動量 [cm]	完了時間 [sec]	移動量 [cm]	完了時間 [sec]
前20	1.55 (± 0.22)	右20	1.81 (± 0.40)	垂直0	1.82 (± 0.37)
前10	1.55 (± 0.26)	右10	1.78 (± 0.24)	垂直10	1.85 (± 0.30)
0	1.82 (± 0.37)	0	1.82 (± 0.37)	垂直20	2.13 (± 0.46)
後10	1.85 (± 0.30)	左10	1.85 (± 0.29)	垂直30	2.22 (± 0.47)
後20	2.01 (± 0.30)	左20	2.01 (± 0.46)	垂直40	2.42 (± 0.90)
鉛直軸周り			水平軸周り		
回転角 [deg]	完了時間 [sec]	回転角 [deg]	完了時間 [sec]	回転角 [deg]	完了時間 [sec]
+60	3.62 (± 0.71)	0	1.96 (± 0.33)		
+30	2.91 (± 0.56)	+30	1.91 (± 0.37)		
0	2.66 (± 0.36)	+60	2.13 (± 0.51)		
-30	2.78 (± 0.42)	+90	2.66 (± 0.36)		
-60	3.71 (± 0.98)				

指示者が正確に指示を行える範囲を指示者側のインタラクション可能範囲とする。また、相手側においては指示者の仮想道具インタフェースがボード上に見える範囲を相手側のインタラクション可能範囲とする。

上記のような実験タスクにおいて、ボードの位置をテーブル面中央を基準に、前後左右と上下、さらに鉛直軸周りと水平軸周りに傾け、インタラクション可能な三次元的範囲を調べた。なお、鉛直軸周りに関しては、ボードをテーブルに対し垂直に立て、ボード面が指示者に対し正面を向いた状態を基準にした。仮想道具インタフェースの表現は先の実験で一番評価が高かった仮想影表現を用いた。また本実験において対面スクリーンに映し出される相手側の映像の解像度は 720×480 [pixel] である。実験の様子を図 14 に、実験結果を表 3 に示す。なお使用者と相手側の被験者は、テーブル奥に置かれたボードの数字を識字可能な視力を有している。

さらに、位置や角度を動かしたボードに対して、実験者がボード上の数字を指定してから指示者によって指示が完了するまでの指示操作にかかる時間を計測した。指示者として指示行為を行ったのは 12 名（理系学生、20-25 歳、男性 12 名）である。ボードの各位置や角度においてそれぞれ 5 回ずつ指示を行った。12 名の指示完了までの時間の平均値と標準偏差を表 4 に

示す．なお，表 4 における前後，左右の方向は相手側のテーブルの前に対面スクリーンを向いて立った場合を基準とした方向である．

テーブル面上を前後左右に動かした場合，ボードを対面スクリーンから一番奥に置いた際，ボード上の文字が小さくなり，見えにくくなると指摘された．操作にかかる時間については，一番奥にボードを配置した場合ではわずかに長くなる傾向が見られたが，これはリーチングの長さの影響も含まれていると推察される．

ボードを鉛直方向に動かした場合，指示者側においては，ボードの高さが上がりカメラの光軸に近づくにつれ，ボード面を横から見る状態になり，ボード上の文字が認識できなくなることが分かった．このことにより指示が難しくなっていることは指示の完了時間の増加からもうかがえる．

水平軸周りに関しては，ボードが垂直になるまで，指示を行うことが可能であり，相手もそれを確認することができる．しかし，ボード面が垂直に近づくにつれ，指示の完了時間が長くなっていることが確認され，指示がやや難しくなっていると推察される．さらにボードを垂直以上傾けるとボード面が陰になるため指示と相手がそれを確認することが困難になった．

鉛直軸周りに関してはボードが対面スクリーンに対し垂直に近くなると，ボード面の真横から見る状態に近づきボード上への指示が困難になることが分かった．

以上をまとめると，指示者側から見ることでできる面に対しては高さ方向を含めて指示を行うことが可能である．ただし，ボードをテーブルに対し，傾けた場合，指示にかかる時間が長くなることが分かった．また，仮想道具映像を上部から投影するため指示対象の面が陰になってしまう場合，仮想道具の先端が投影されず，正確な指示と相手側の理解が困難になることが分かった．

4.3 遠隔の個物とのインタラクション実験

最後に，どのような指示行為や共同造形行為が可能であるか調査するため，既知の間柄の被験者 10 組 20 名（理系学生，20-24 歳，男性 18 名，女性 2 名）を対象に，一方の場所の発泡スチロールの立方体や円錐などを，もう一方の場所から仮想道具を利用した造形作業を自由に行ってもらった．なお，インタラクションの際には音声対話はしないこととし，約 2 分間体験した．終了後にはどのようなインタラクションができたか，道具の操作にどのような印象を持ったのかについて，コメントを用紙に記述するよう指示した．

仮想道具インタフェースを利用したインタラクションの観察結果を表 5 にまとめ，インタラクションの状

表 5 本システムによるインタラクションの観察結果
Table 5 Observations of interaction by utilizing this system.

- ・自分の空間から相手の空間にまで仮想道具を自由に動かしながら伸ばす（図 15(a)）
- ・相手の空間の個物の上や横に仮想道具を投影する（図 15(a)）
- ・仮想道具を利用してテーブル上のオブジェクトを指し示す（図 15(b)）
- ・仮想道具を利用してテーブル上のオブジェクトの移動などを指示する（図 15(c)）
- ・オブジェクトの上に別のオブジェクトを積み重ねるように仮想道具によって指示する（図 15(d)）
- ・相手の仮想道具の指示に従い，高さのある造形物に積み上げていく（図 15(d)）
- ・お互いの表情や身振りを見ながら，インタラクションを行う
- ・テーブルの正面のみならず，斜め前や，横から参加している（図 15(e)）
- ・複数人対複数人で参加している（図 15(f)）

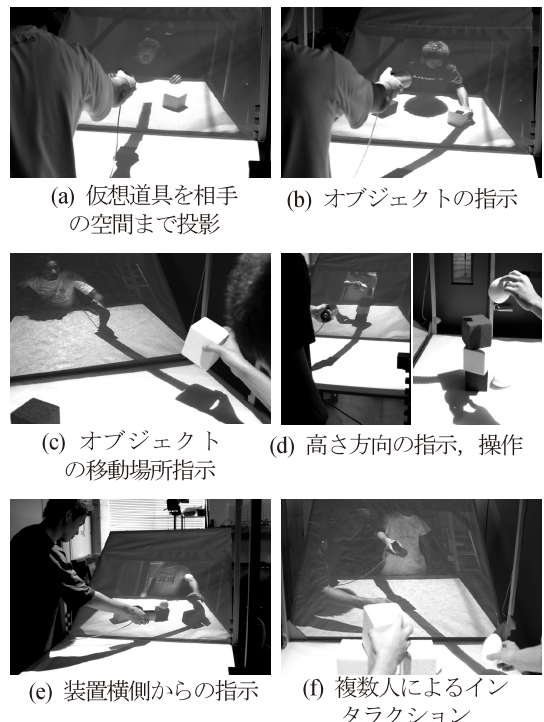


図 15 仮想道具を利用したインタラクションの様子

Fig. 15 Various scenes that people interact with a remote people by utilizing virtual tool.

況を図 15 に示す．また，インタラクション後のコメント調査の結果を表 6 にまとめる．

以上の結果から，従来のシステムでは困難であった，実体のオブジェクトをとともうインタラクションにおいて，左右，奥行き，高さ方向の知覚や指示を支援すること，テーブルの周りを比較的自由に移動できるこ

表 6 インタラクション後の仮想道具の操作に関するコメント
Table 6 Summary of comments on a sense of interacting with a virtual tool.

- ・道具を伸ばしている感覚がする
- ・道具で相手のテーブルを触っている感覚がする
- ・道具で相手の空間のオブジェクトを触っている感覚がする
- ・道具を操作することで相手に指示をしやすい
- ・道具の操作によりオブジェクトを操作する位置を指示できる
- ・高さ方向に積み上げてもオブジェクトの位置を理解できる
- ・道具によって相手に高さ方向のオブジェクトの指示ができる
- ・相手の表情が見え、相手の伝えたいこと推測しやすい
- ・遠隔の映像に奥行き感を感じる
- ・高さのある造形物を作った際、その奥にあるものが、隠れてしまい指示がしにくい
- ・速く動かすと実体の道具との間にズレを感じる

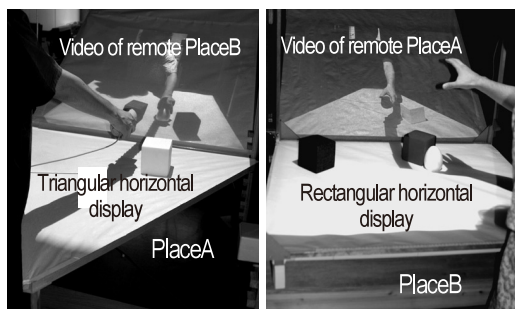


図 16 異なる形状のテーブルどうしを接合
Fig. 16 Connection between different shape tables mutually.

となど本システムの特長が示された。さらに、2名以上の人間がインタラクションに同時に参加できることも示した。コメント調査により、仮想道具インタフェースによって自身があたかも長い道具を操作している感覚や、相手の空間にまで道具を伸ばしている感覚が創出することも示唆された。

また、異なるテーブルどうしの接合の例として、一方の空間において長方形、もう一方の空間において三角形のテーブルどうしの接合を試みたところ、同形状のテーブルを接合表現したときと同様のインタラクションが可能であることが確かめられた。その様子を図 16 に示す。

5. 考 察

5.1 指示行為の共有

実物の指示棒での指示の容易性に影響を与える 2 つの要因として、指示対象の見えやすさと指示対象までのリーチング経路とが考えられる。本手法では 4.2 節の実験において、指示の対象となるボード面を水平か

ら傾けるにつれ、指示の完了時間が長くなる傾向が見られた。特に、テーブルに対し垂直に立て、指示者に対し正面を向けたとき、ボード面を水平にしたときよりも指示完了時間が長くなった。このことは、指示対象の見えやすさと指示対象までのリーチング経路以外に、本手法における指示の容易性に影響する要因があることを示唆している。本手法は仮想影の映像を上方から投影する手法である。したがって指示対象面を水平面から傾けた場合、把持した手の動きに対し、仮想影の先端は、指示対象面が水平のときよりも大きく動く。これは指示対象面の法線ベクトルと仮想影を投影するプロジェクタの光軸方向のベクトルのなす角が大きくなればなるほど、顕著になる。対象面と仮想影のこのような関係は、指示行為に影響を与える本手法特有の特徴と考えられる。

また、本手法では個物の陰となっている部分や、対面スクリーンで視認できない遠隔の個物の裏側への直接の指示は行えない。この問題を解決する方法として、相手に対し、指示すべき箇所を指示者側に向け、プロジェクタの投影範囲に入るように移動を指示することが考えられる。あるいは、先に著者らが開発したように双方で操作可能な可動型のテーブルなど、ロボット型の道具を利用する方法も考えられる。これにより、空中や陰となった部分への指示をしたり、個物を物理的に直接移動操作したりすることも可能となるであろう。このことは、遠隔地間での共同作業における指示行為の可能性をより広げ、自身と相手の映像空間において操作可能な仮想道具インタフェースの有効性を示すものである。

5.2 仮想道具インタフェースの表現手法

仮想影表現によって、把持している木の棒とそのすぐ下に投影される道具の仮想映像との分離感や違和感が軽減されるだけでなく、自身があたかも長い道具を操作している感覚や、相手の空間にまで道具を伸ばしている感覚が報告されたことは興味深い。この主観調査の結果は仮想道具インタフェースと身体との関係が、強められている可能性を示唆するものである。

道具を使用する際に、道具と身体があたかも一体になったり、道具へ身体が拡張したりする感覚を日常的に経験している¹⁴⁾。たとえば、使い慣れたラケットを操作するときには、自身の身体の一部のように、ラケットの存在を意識しなくてもボールを打ち返すことができたり、あたかも自身の身体で直に触れたかのような感覚が生じたりすることがある。このような道具と身体との非分離的な関係は、昨今の脳科学や認知科学の分野で注目され、様々な知見が報告されている^{15),16)}。

こうした道具と身体の関係が仮想道具インタフェースにおいても生じている可能性が推測される。本インタフェースは、5.1節で述べたとおり通常の指示棒とは見え方や操作の仕方が異なるため、被験者にとっては初めて使用する道具であった。本インタフェースの使用頻度と、身体との非分離的な関係生成の問題については、仮想道具の表現を様々に変化させることや、被験者がこれまでに利用した仮想的な道具の体験の影響などをふまえてさらに検討したい。

また、黒い棒の表現に対して、被験者が「長い棒の影が投影されているように感じる」と報告したことは、自身が手にした道具の影と仮想影が1つの道具の影として統合された効果として、仮想道具インタフェースと身体との関係が強められた結果と推察できる。一方で、4.1節の実験において仮想影を用いたときの作業効率は他の仮想道具の表現手法と比較して有意な差はなかった。この実験のように仮想影の先端を指示のための道具として利用する場合には、影に対する我々の日常的な認知の仕方とは異なり、棒やポインタの表現と同じように対象的に扱っている可能性が示唆される。あるいは、長い道具を操作している感覚や、相手の空間にまで道具を伸ばしている感覚の創出が必ずしも、作業効率に影響を与えるものではない可能性も考えられる。Miwaらの影の研究において、影によってその個物の存在が喚起されることが示されており¹⁷⁾、影表現のはたらきによる道具と身体の関係については今後の課題である。

以上のような道具と身体との非分離の関係という問題は、インタラクションの効果に重点をおいたコンピュータメディアにおける従来の道具の研究と比較して、あまり着目されておらず、まだほとんど取り組まれていない。映像空間において多様なインタラクションを創出する道具のデザインという問題をふまえると、身体の働きを拡張するという視点から検討する必要がある¹⁸⁾と著者らは考えている。

6. ま と め

本研究では、遠隔の異なる空間を双方で接続し、3次元的な指示行為を支援するために、空間を制約するのではなく、互いの空間で自由に操作可能な道具を利用する手法を提案した。そこで、カメラとスクリーンの配置に工夫を施した対面型のディスプレイと、把持した実体の道具に映像の道具を投影する仮想道具インタフェースからなるシステムを開発した。インタラクション実験の結果、相手の空間の個物を固定視点ではあるが3次元的に見えること、映像の棒をテーブル上

の個物に投影することで高さ方向も含めた指示が可能であること、そして、双方のテーブルの周囲を自由に移動できること、複数人が自由に参加できること、さらには異なる形状のテーブルどうしを接続できることを明らかにした。本手法によって、従来の空間共有技術と比較して、より高い空間性と双方向性を実現する可能性を示した。

さらに、仮想的な影の表現により、実体の道具とテーブル上に投影される映像の道具との幾何的な分離に対する違和感を減少させるだけでなく、仮想道具インタフェースと操作者の身体とのつながりが強まる可能性も見出した。このような身体と道具との非分離的な関係についての研究は未開拓の領域であり、実践的な共同作業を支援するだけでなく、インタラクションの幅を広げるための新たな道具のデザイン方法についても今後さらに研究を進める。

謝辞 本研究の一部は、岐阜県からの委託研究であるWABOT-HOUSEプロジェクトおよび、日本学術振興会2007年度科学研究費補助金(課題番号18300044)により行われた。また本実験システム構築にあたり、当研究室の学生であった久保友明氏の協力を得た。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Heath, C. and Luff, P.: Disembodied conduct: Communication through video in a multi-media office environment, *Proc. CHI'91*, pp.99-103 (1991).
- 2) Isaacs, E. and Tang, J.C.: What Video Can and Cannot Do for Collaboration, *Springer-Verlag Journal Multimedia Systems*, Vol.2, pp.63-73 (1994).
- 3) Yamashita, J., Kuzuoka, H., Yamazaki, K. and Yamazaki, A.: Agora: Supporting Multi-participant Telecollaboration, *Proc. HCI International 1999*, Vol.2, pp.543-547 (1999).
- 4) Ishii, H., Kobayashi, M. and Grudin, J.: Integration of Interpersonal Space and Shared Workspace: ClearBoard Design and Experiments, *ACM Trans. Information Systems*, Vol.11, pp.349-375 (1993).
- 5) Tachi, S.: TELE-EXISTENCE-toward Virtual Existence in Real and/or Virtual Worlds, *Proc. ICAT1991*, pp.85-94 (1991).
- 6) Hedberg, S.R.: Virtual reality at boeing: pushing the envelope, *VIRTUAL REALITY special report*, Jan.-Feb., pp.51-55 (1996).
- 7) Sellen, A.J.: Speech patterns in video-mediated conversations, *Proc. CHI'92*, pp.49-59 (1992).

- 8) Fish, R. Kraut, R. and Chalfonte, B.: The videowindow system in informal communication, *Proc. CSCW'90*, pp.1-12 (1990).
- 9) Morikawa, O. and Maesako, T.: HyperMirror Toward Pleasant-to-use Video Mediated Communication System, *Proc. CSCW'98*, pp.149-158 (1998).
- 10) 上杉 繁, 三輪敬之: 身体の映像表現と実体ツールとのインタラクションによる共存在的コミュニケーションシステム, *ヒューマンインタフェース学会誌・論文誌*, Vol.6, No.3, pp.295-305 (2004).
- 11) Kuzuoka, H., Oyama, S., Yamazaki, K., Yamazaki, A., Kato, H., Suzuki, H. and Miki, H.: GestureLaser: Supporting Hand Gestures in Remote Instruction, *Video Proc. CSCW'98* (1998).
- 12) Tachi, S., Kawakami, N., Inami, M. and Zaitzu, Y.: Mutual Telexistence System Using Retro-Reflective Projection Technology, *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol.1, No.1, pp.45-64 (2004).
- 13) 株式会社ソリッドレイ研究所.
www.solidray.co.jp/product/eizou/screen.html
- 14) 市川 浩: 「身」の構造 身体論を超えて, 講談社学術文庫 (1993).
- 15) Iriki, A., Tanaka, M. and Iwamura, Y.: Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurons, *Neuroreport*, Vol.7, pp.2325-2330 (1996).
- 16) Maravita, A., et al.: Tool-use changes multimodal spatial interactions between vision and touch in normal humans, *Cognition'83*, B25-B34 (2002).
- 17) Miwa, Y. and Ishibiki, C.: Shadow Communication: System for embodied interaction with remote partners, *Proc. CSCW 2004*, pp.467-476 (2004).
- 18) 清水 博, 久米是志, 三輪敬之, 三宅美博: 場と共創, NTT 出版 (2000).

(平成 19 年 4 月 6 日受付)

(平成 19 年 9 月 3 日採録)



渡辺 貴文

平成 18 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年同大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程入学。現在に至る。身体的インタフェース技術に興味を持つ。ヒューマンインタフェース学会, 日本認知科学会各会員。



上杉 繁 (正会員)

平成 11 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。大日本印刷(株), 金沢工業大学場の研究所, 早稲田大学理工学部助手を経て, 同大学先端科学・健康医療融合研究機構助手, 講師。平成 19 年より同大学創造理工学部総合機械工学科専任講師。博士(工学)。主に共創インタフェース, 場のコミュニケーション・テクノロジーの研究に従事。ヒューマンインタフェース学会, 日本機械学会, IEEE, ACM 等の会員。



三輪 敬之 (正会員)

昭和 51 年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了。同大学助手, 講師, 助教授を経て, 昭和 61 年同大学理工学部機械工学科教授, 平成 19 年より同大学創造理工学部総合機械工学科教授, 現在に至る。工学博士。場の工学技術, 共創システム, 植物のコミュニケーション等の研究に従事。日本機械学会フェロー, ヒューマンインタフェース学会, 電子情報通信学会, IEEE, ACM 等の会員。