

基礎論文

変型ビルボードを用いた人物像の提示による
複合現実感卓上作業の遠隔共有南谷 真哉 北原 格 亀田 能成 大田 友一^{*1}

Remote Collaborative Tabletop Mixed-Reality by Using Deformed Billboard Technique

Shinya Minatani, Itaru Kitahara, Yoshinari Kameda and Yuichi Ohta^{*1}

Abstract – This paper proposes “Remote Shared Mixed-Reality” that enables multiple users in distant places to share a same Mixed-Reality space. In this paper, we propose a novel face-to-face tabletop type remote collaboration system to share the same tabletop MR space by two users sitting in distant places. In order to realize the system, the system has to execute the all processes, capturing, sending, and rendering the appearance of users, real/virtual objects in real time.

Keywords : Collaborative Mixed Reality , Billboard , Tele-Immersion , Table-top Communication

1 はじめに

複合現実感 (MR: Mixed Reality) とは、コンピュータグラフィックス (CG) によって描かれた仮想物体を現実空間に継ぎ目無く重畳した映像をユーザに提示する技術である [1]. この技術の発展型として、複数のユーザが同一の複合現実空間を共有することにより、現実と仮想の両方の視覚情報を用いながら協調作業を行うことができる協調型複合現実感 (Shared Mixed Reality) の研究が進められている [2]. 協調型複合現実感では、視覚情報の共有により円滑なコミュニケーションが可能となるが、互いの姿や空間中に存在する実物体を共有する、つまり全ユーザが同一の現実空間に存在していることが前提条件となる. そのため、離れた場所に存在するユーザ同士での協調作業に協調型複合現実感を適用することは困難である.

一方で、近年のネットワーク技術の発達により、テレビ会議システムなど遠隔地のユーザとコミュニケーションや協調作業を行う技術の普及が進んでいる. 我々は、ネットワーク技術を活用することにより、協調型複合現実感が有する物理的制限を取り除き、遠隔地における複合現実空間の共有を目的とした研究に取り組んでいる.

複合現実空間中のユーザは、現実空間に仮想物体を重畳した映像を観察するためにヘッドマウントディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) を装着している. 特に、現実世界の見え方をビデオデータとして撮影・提示を行うビデオスルー型 HMD を利用す



図1 HMDによるMR空間映像例
Fig.1 Example of MR view through HMD

る場合、図1に示すように、仮想物体だけでなく、人物や現実の背景など実物体も、ビデオ映像として電子的に取り扱われる. 我々は、このビデオスルー型 HMD を用いた協調型複合現実感の特徴とネットワーク技術を統合することにより、図2に示すような空間を越えて複合現実空間を共有し、遠隔地のユーザと同一の空間でインタラクションを行っているかのような感覚を与えることができる“遠隔協調型複合現実感”の実現を目指している.

本研究では、遠隔協調型複合現実感を用いた遠隔協調作業の一例として対面卓上作業を取り上げ、その評価、検証を行うためのプロトタイプシステムとして遠隔オセロゲームの実装を試みる. 現在利用可能な一般的コンピュータ・ネットワーク環境において、遠隔地の人物像を実時間で複合現実空間中に提示する技術として、変型ビルボードを用いた人物像提示手法を提案する.

^{*1}筑波大学 大学院システム情報工学研究科

^{*1}Graduate School of Systems and Information Engineering, Univ. of Tsukuba

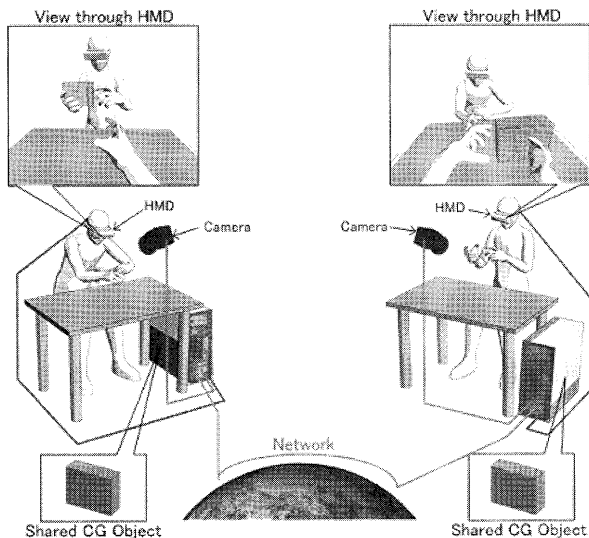


図2 遠隔協調型複合現実感の概念
Fig.2 Concept of Remote Shared-MR

2 関連研究

ネットワークを介して遠隔地で視覚情報を共有するテレビ会議システムは、これまでも活発に研究されており、実用化が始まっている。ネットワーク技術の発達に伴い、画質・解像度・フレームレートは格段に進歩しているが、カメラで撮影された互いの映像をテレビモニタ越しに観察しながらコミュニケーションを行うという形態は変わっておらず、空間を共有してコミュニケーションをいえるような感覚を与えるには至っていない。

遠隔地のコミュニケーション相手があたかも実際にその場にいるかのように感じさせる技術として、臨場感通信 (Tele-Immersion) の分野の研究が行われている [3][4]。これらの研究では、ユーザの視覚情報を映像から切り出し、それを違和感なく合成する技術が提案されているが、最終的にユーザに提示される映像は、現実世界の3次元形状に基づいたものではなく、従来のテレビ会議同様、2次元スクリーン上に提示されるの映像であるため、あたかも相手が目の前に存在するかのような感覚を与えることは困難である。

近年のネットワーク通信帯域の発展に伴い、人物の3次元情報のような現実世界の幾何情報を遠隔地間で共有する複合現実空間に関する研究が盛んに行われるようになってきた。Fuchs らは "The Office of the Future" と題し、プロジェクタベースの複合現実感提示とイメージベーストレンダリングを用いた自由視点人物像提示により、相手が目の前に存在するかのような協調作業空間を提案しており、それを実現するための様々な関連研究が行われている [5][6]。しかし、これらのシステムでは、遠隔地の相手が現実の空間中に存在

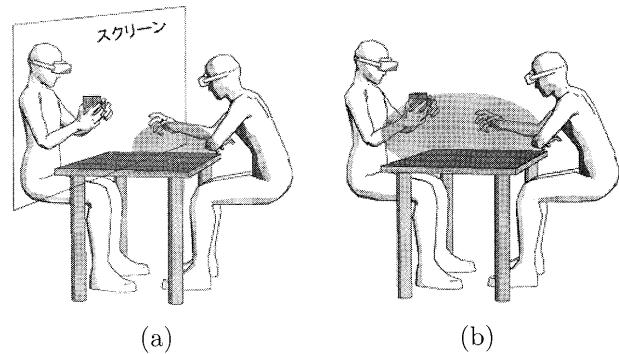


図3 互いの空間に入り込んだインタラクション
Fig.3 Spatial interaction into each side

するような映像を提示することにより、空間を“共有しているような”インタラクションの実現は可能であるが、図3(a)に示すように、実際には現実空間と遠隔地は映像を提示するスクリーンによって分断されているため、相手側の空間に入り込んでのインタラクションを行うことはできない。協調作業の観点から遠隔コミュニケーションシステムを考えると、相手のジェスチャーや視線方向などの非言語情報と共に、互いに入りこめるような状態で共同作業空間を共有し、その中での空間的なインタラクションを可能にすることが重要である [7]。

本研究では、ビデオスルー型 HMD を用いた協調型複合現実感の特性を利用し、図3(b)に示すように、従来の遠隔協調型複合現実空間に存在したテレビモニタやプロジェクタスクリーンなどで起こるインタラクション空間の分断のない、遠隔協調作業空間を提供する遠隔協調型複合現実感の実現を目指す。様々なシチュエーションが想定される遠隔協調作業の中で、特に [2][5] などでも取り上げられている対面卓上作業を取り上げ、互いの卓上面に入り込んでインタラクションが可能となる遠隔協調型複合現実感システムの構築を目的とする。

遠隔地の人物像を現実世界に提示するような複合現実感や拡張現実感を用いた卓上作業のインタラクションシステムの研究としては、これまで [8][9] などのシステムが考案されている。このようなプロジェクタベースの提示方式では、協調作業を行っている相手の人物像を提示できる領域はプロジェクタで映像を投影可能な卓上面に限られている。そのため、対面での協調作業において重要といわれる空間的なインタラクションの共有や非言語情報の提示は、人物像を提示するためにより大掛かりな装置を必要とするほか、人物像とユーザ自身とのオクルージョンを再現することが困難となるため、空間的なインタラクションの再現が難しいと考えられる。また、人物像がスクリーンに投

南谷・北原・亀田・大田：変形ビルボードを用いた人物像の提示による複合現実感卓上作業の遠隔共有

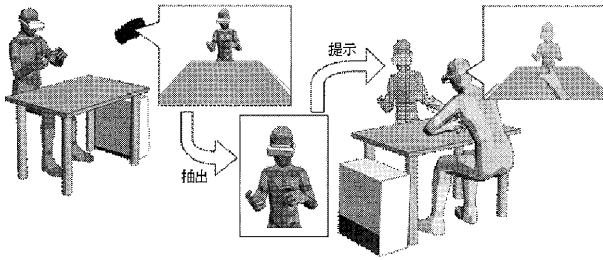


図4 遠隔協調型複合現実感における人物像提示
Fig. 4 Appearance representation in Remote Shared-MR

影されているということがユーザに明確に分かってしまうため、あたかも相手が目の前にいるかのような感覚を与えることも難しいと考えられる。

3 遠隔協調型複合現実感

ビデオスルー型 HMD を用いた協調型複合現実感では、インタラクションを行っている他のユーザの姿は、HMD に内蔵されたカメラで撮影した映像を電子的に観測していることになる。そこで我々は、図4に示すように、ユーザの人物像を切り出し、仮想物体と同じように、実空間に継ぎ目無く融合させることができれば、実際には同一空間を共有しない人物と複合現実感を共有し、協調作業を行えるのではないかと考えた。

本研究で実現する遠隔協調型複合現実感では、遠隔協調作業の題材として二人のユーザによる対面作業を選定する。また、その中で行うインタラクションを卓上作業とし、仮想的に正対して座っている二人のユーザの間にある卓上面において仮想・実物体を操作することにより協調作業を行う。

従来の協調型複合現実空間において対面卓上作業を行う場合、ユーザが装着する HMD には、HMD カメラで撮影した実空間映像と仮想物体が提示される。実空間映像の中には、正対して座っている相手ユーザの人物像、卓上に存在する操作可能な実物体、周囲の実空間背景の三つの領域が混在している。一方、遠隔協調型複合現実感では、相手ユーザがその場に存在しないため、実空間映像の中には相手ユーザの人物像が含まれていない。また、卓上面にある実物体も、もう片方のユーザ側の卓上面にある物体は、もう片方のユーザ側の実空間映像には含まれない。つまり、遠隔地間において従来の協調型複合現実感と同様の視覚効果を再現するためには、相手ユーザの人物像と、相手側にある実物体の視覚情報を再現する必要がある。

4 変形ビルボードを用いた人物像提示

協調型複合現実感において、実空間と仮想空間を違和感無く合成するためには、幾何的整合性、光学的整合性、時間的整合性の三つの整合性が重要とされている。中でも、円滑なコミュニケーションの実現においては、幾何的整合と時間的整合性の重要性が高い。また、ユーザの表情の変化などの細かい非言語情報の伝達に影響することから、遠隔地の実物体を撮影した映像の解像度も重要である。このような条件に基づき、提案する遠隔協調型複合現実感では、実物体の視覚情報を高解像度で撮影し、少ない遅延時間で伝送し、正確な位置に提示することを目標とする。

多視点カメラ映像を取得し、人物像の3次元形状と高解像度テクスチャを獲得することにより、自由な視点位置から観測した人物像提示を実現することが可能であるが [10]-[13]、現在の計算機・ネットワークの能力ではリアルタイムで実行や伝送が困難であり、現実的ではない。そこで本研究では、遠隔地のユーザの人物像の取得、伝送、レンダリングをできる限り高速・高解像度で処理するために、ビルボードを用いた形状表現方式を導入することにより、人物像取得の簡素化と情報量の削減を実現する。

4.1 ビルボード法を用いた3次元形状表現

我々は、対象物体の3次元形状を忠実に表現する代わりに、1枚の面で物体の形状を近似表現するビルボード法を採用する。この手法は、物体の3次元形状を復元するのではなく、対象物体の位置・姿勢と観察者の視点位置からビルボードの3次元空間中での位置・姿勢を算出するもので、対象となるシーンを撮影するために必要なカメラは1台で済み、モデリングやレンダリングの計算コストが少ないという特徴を有する。その一方で、高解像度カメラを用いて視覚情報を撮影することにより、ビルボードに投影される画質を容易に向上させることが可能な上に、伝送するデータはカメラ1台分の映像データのみであるため、現行のネットワーク帯域で十分にリアルタイム伝送が可能であり、リアルタイム処理と、人物や実物体の映像の高解像度の両方の実現が可能という特長を有する。

4.2 ビルボード形状の検討

一般的なビルボード法では、地面に垂直に立てた平面的ビルボードを用いる。このとき、ビルボード自体が単なる面であることを悟られないよう、ビルボードの面を常にユーザの視点の方向に向くように回転させる。このような手法は、ユーザの視点ビルボードに対して遠方にあるときや視点の移動が激しい場合に適しているとされ、本研究で想定しているような近距離で視点移動がほとんどない環境には適用できない。また、図5に示すように、ビルボードが地面に垂直に立って

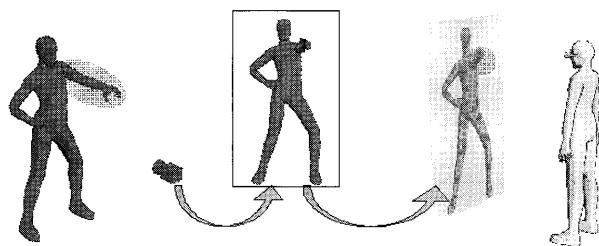


図5 人物ビルボード法における奥行き情報の欠落

Fig. 5 Lack of depth information in billboard technique

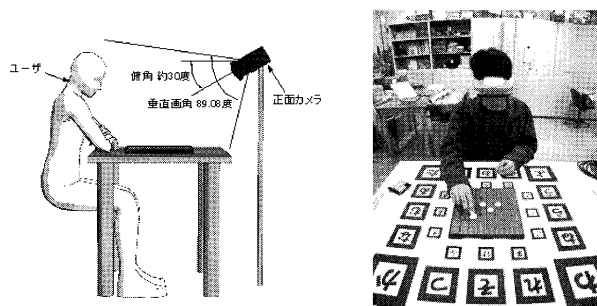


図6 正面カメラの配置と撮影映像例

Fig. 6 Layout and example of view of Front camera

いる場合、地面と水平の方向の奥行きを再現することができないため、水平面である卓上作業におけるユーザの手を正しい位置に提示することは困難である。本研究では、ビルボードの形状やそれに合わせたカメラ配置を工夫することにより、近距離の対面卓上に適用可能な新しいビルボード提示手法を検討する。

近距離で対面卓上作業を行う場合、ユーザの注視対象は、ユーザの正面に存在する相手の人物像と、斜め下方向にある卓上面となり、ユーザは主に正面と斜め下方向を見回しながら作業を行う。そこで、この視点の見回しに対応するため、図6に示すように人物像と卓上面を撮影するカメラ（正面カメラ）を相手ユーザの視点位置付近に設置し、そこからユーザの人物像と卓上面が画角中に収まるように、カメラの光軸方向を斜め下方向（約30度）に傾けて固定した。正面カメラには超広角レンズ（水平面角：89.08度）が取り付けられており、このカメラを光軸中心に90度回転させて使用しているため、卓上面全体と人物像の頭部までの撮影が可能である。

傾倒平面ビルボード

ビルボードの配置を正面カメラの配置に合わせ、図7に示すように正面カメラの光軸と垂直になる角度に傾けて配置する“傾倒平面ビルボード”を検討する。ユーザの視点位置は、座った状態からはほとんど移動

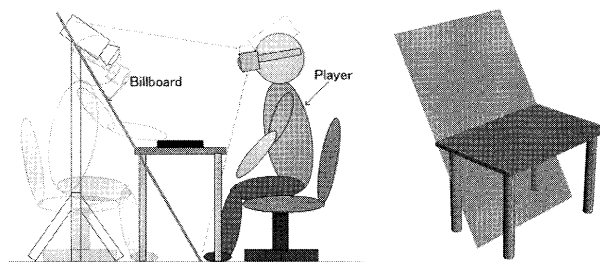


図7 傾倒平面ビルボード

Fig. 7 Tilted flat billboard

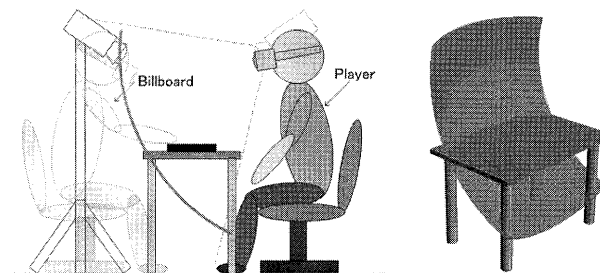


図8 2次曲面ビルボード

Fig. 8 Curved billboard

しないため、ビルボードが提示される位置と向きは世界座標に常に固定され、ユーザの視点位置に応じて回転させることはない。このような配置にすることにより、正面カメラの位置と対向する位置から見た場合には、卓上面まで伸ばした腕などに関してある程度の奥行き感を表現することができる。

しかし、1枚のポリゴンで表現されている傾倒平面ビルボードでは、ユーザの見回し角度（俯角）が中心から離れるにつれ、相手ユーザの体の表面からビルボード表面までの距離が大きくなるため、視点移動時の歪みが大きくなってしまふといった問題が存在する。

2次曲面ビルボード

前述の問題を解決する手法として、図8のように、1枚の平面ポリゴンよりもユーザの体の表面に近い形状を持つ2次曲面（球体表面の一部）としてユーザ形状を近似表現する。この手法を“2次曲面ビルボード”と呼ぶ。一般的なグラフィックボードのGPU（Graphic Processing Unit）では直接曲面を扱うことができないため、2次曲面は多数の三角形ポリゴンを結合した形で表現する。

正面カメラに取り付けられた超広角レンズを通して取得した映像には図6に見られるように樽型歪曲収差が生じているが、ソフトウェア処理によって歪曲収差の補正処理を行うとCPUの計算コストが増大し、実時間性が損なわれてしまう。

そこで、2次曲面の曲率半径を、正面カメラの内部パラメータを基に算出し、正面カメラの画像面の曲率

南谷・北原・亀田・大田：変型ビルボードを用いた人物像の提示による複合現実感卓上作業の遠隔共有

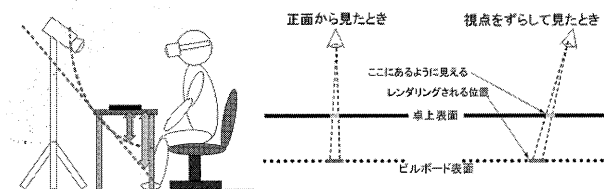


図9 視点位置によって見え方が異なる問題
Fig.9 Viewpoint problem in billboard technique

とほぼ一致するように設定することにより、人物形状の近似精度を高めると同時に、樽型歪曲収差の補正処理をハードウェア処理により実現する。この処理は、GPUのポリゴン描画支援機能とテクスチャマッピング支援機能を活用することができるため、高速なレンダリングが可能である。

変型ビルボード

これまで提案してきたビルボードを用いた近似提示手法の場合、ビルボード上にレンダリングされる人物像と実空間との間の距離が大きく異なる部分が存在する。対面卓上作業においては、卓上面付近に提示される腕や手が適切な位置や大きさでレンダリングされることが、円滑なインタラクションのために重要である。図9に示すように、傾倒平面ビルボードや2次曲面ビルボードでは、卓上面からビルボード表面までの距離がどうしても離れてしまう。観察する視点位置が相手側の正面カメラの位置と一致する場合、この距離は問題にならないが、観察する視点位置が相手側の正面カメラの位置から移動する場合、卓上面付近に提示される腕や手が適切な位置に重畳されなくなってしまう。人物像の提示位置や形状を厳密に再現するためには、人物像の3次元形状をデプスセンサやステレオカメラなどを用いて測定し、その形状どおりに3次元的に変形させたビルボードを提示させるという方法も考えられるが、先述のとおり、3次元形状の取得や伝送、復元に膨大な計算コストがかかるため、実時間性を必要とする遠隔協調作業においての実現は困難である。今回の作業環境では、厳密な提示位置を求められる部分は主に卓上面に限定でき、それ以外の場所は、ユーザの視点から見てできるだけ歪みや位置ずれが軽減されるような近似的な形状であれば、協調作業の作業効率にはほとんど影響しないのではないかと考えた。そこで、図10に示すように、2次曲面ビルボードにおいて卓上面部分がレンダリングされる領域の三角形ポリゴン群を卓上面まで引き上げた“変型ビルボード”を考案した。

“変型ビルボード”は、各三角形ポリゴンの頂点座標を、2次曲面ビルボードの場合の各頂点座標から、

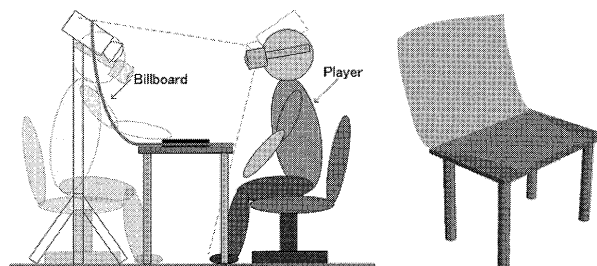


図10 変型ビルボード
Fig.10 Deformed billboard

正面カメラのカメラ中心の方向に向かって卓上面まで引き上げることで、ビルボード表面を卓上面と一致させるとともに、2次曲面ビルボードで得られていた歪曲収差補正の効果も有している。また、卓上面以外の正面人物像領域においては、2次曲面ビルボードと同様にポリゴン群を配置する。人物像領域と卓上面領域との境目付近では、互いのビルボードが滑らかに接続されるようにポリゴン群の配置座標を曲げている。

このような配置・形状することにより、卓上面にレンダリングされるユーザの腕や手の位置や大きさは、平面的には実空間の正しい位置や大きさでレンダリングされるため、厳密な腕や手の位置が円滑な協調作業に影響するような対面卓上作業であれば違和感のないインタラクションが実現される。

5 遠隔協調型複合現実感システムの構築

本研究では、人物像の取得と提示手法に注目するため、実物体の取得と提示はできるだけ簡略化したいと考えた。そこで、実物体情報の取得が容易で、かつその情報を相手側に提示することが容易なオセロや囲碁などのボードゲームを適用対象とした。本節では、図11のような遠隔オセロゲームを遠隔協調型複合現実感によって実現し、遠隔地の対戦相手があたかも目の前にいるかのような映像を提示するための人物像の取得・伝送・提示手法を述べるとともに、ゲーム盤上の駒を取得し遠隔地の相手の盤上に仮想物体として提示する手法について述べる。

5.1 ハードウェア構成とデータフロー

本システムにおけるハードウェアは、図12に示すような構成となっている。ユーザは互いにゲーム盤の置かれた机の前に座っている。机の向う正面には、垂直画面角89.08度の超広角レンズが取り付けられたカメラ（正面カメラ）が一台設置されており、ユーザの人物像全体と卓上面全体を撮影する。その光軸は水平から約30度下に傾けてられた状態で固定されている。卓上面に置かれる実物体（本システムの場合はオセロの駒）の状態は、正面カメラの映像から抽出される。

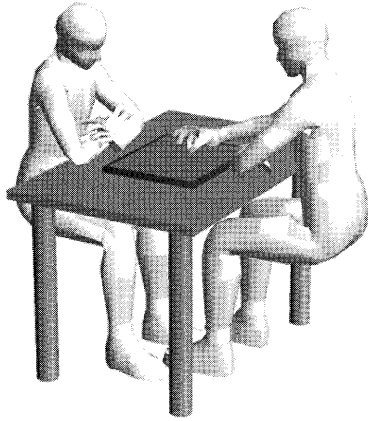


図 11 遠隔オセロゲームの概観
Fig.11 Overview of Remote MR Othello Game

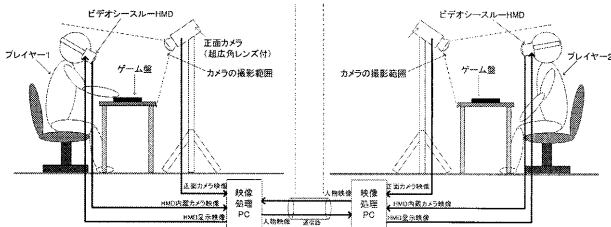


図 12 ハードウェア構成
Fig.12 Hardware Layout

双方のユーザは、両眼提示ビデオシースルー型HMDを装着している。HMDの位置と姿勢は、ARToolkit-Plusのマルチマーカ機能を利用して算出する[14]。マルチマーカは図13に示すようにビルボードや実物体がレンダリングされる領域全体に配置されており、ユーザの頭部がどこを向いてもHMD内蔵カメラにマーカが写りこむようになっている。

これらのカメラとHMDは、一台のPCに接続され、そのPCはイーサネットを介して遠隔地の複合現実空間のPCに接続されている。ネットワーク経由で、ユーザの人物像や卓上の状態をリアルタイムで相手に伝送することにより、遠隔協調作業を実現する。

図14に本システムの処理の流れを表すデータフローを示す。本システムの処理内容は、人物像の取得・伝送・提示の各々の処理にあわせて、“Capturing Stage”，“Data Transmission”，“Rendering Stage”の3つのステージで構成されており、我々はこれらを各PCにてリアルタイムで処理可能なシステムを構築した。

6 システムの性能評価実験

6.1 実験環境

本研究で使用する計算機は、一般的なパーソナルコンピュータを想定している。本実験には表1のような

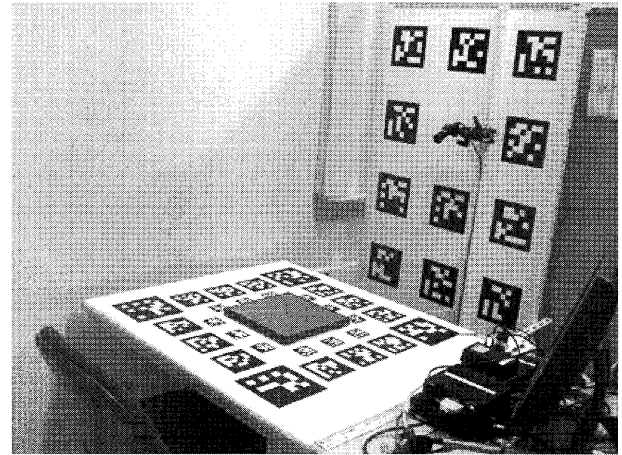


図 13 ARToolkit マルチマーカの配置
Fig.13 Layout of multi-markers of ARToolkit

構成のコンピュータを用いた。このような実験用コンピュータを同一構成で1ユーザに1台ずつ、計2台使用して実験を行った。2台のコンピュータは、スイッチングハブを1台経由してギガビットイーサネット接続されている。

正面カメラに用いる高解像度カメラとして、Point-GreyResearch社のFlea2を使用した。1024x768 [pixels]の映像を30 [fps]でキャプチャすることができる。正面カメラのレンズとして、FUJINON製のカラーCCD用超広角レンズTF2.8DA-8(焦点距離:2.8 [mm]固定)を使用し、Flea2と組み合わせた場合、水平画角は89.08度、垂直画角は69.20度得られる。本実験環境では、このカメラを光軸方向に90度回転させて用いることで、垂直方向により広い画角を確保した。

ビデオシースルー型HMDには、Canon製のCOASTAR (Co-Axis See-Through for Augmented Reality)型HMDを使用している。内蔵LCDパネルの最大解像度はVGA (640x480 [pixels])であり、本システムからのHMD出力映像も640x480 [pixels]に設定されている。HMD正面の実空間背景を撮影する内蔵カメラとして有効画素数30万画素のNTSCカメラを搭載しており、NTSC信号をビデオキャプチャカードI-O DATA製GV-VCP3R/PCIにより、640x480 [pixels]インタレースの映像としてコンピュータに取り込まれる。

本システムにおけるビデオキャプチャライブラリに

表 1 実験用コンピュータの基本性能
Table 1 Specification of experimental PCs

CPU	Intel Xeon X5355 (2.66GHz Quad-core)
RAM	4GB (2GB x2)
GPU	nVidia Quadro FX 4600 x2 (非 SLI 構成)

南谷・北原・亀田・大田：変型ビルボードを用いた人物像の提示による複合現実感卓上作業の遠隔共有

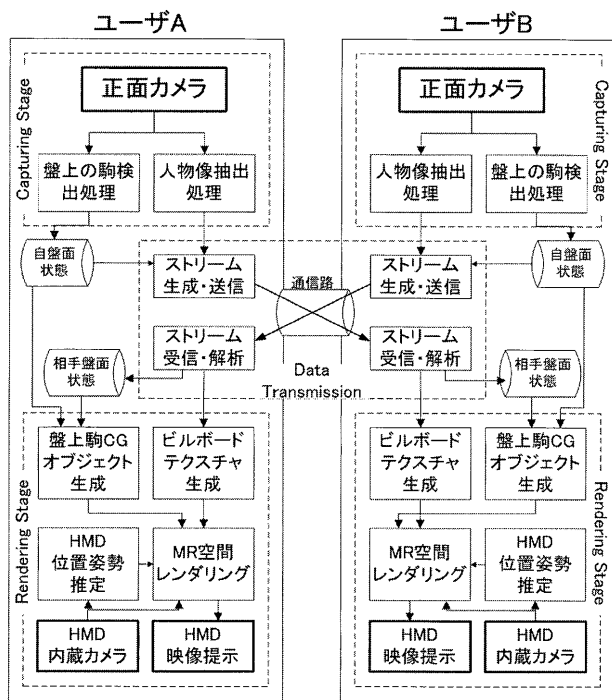


図 14 遠隔オセロシステムのデータフロー
Fig. 14 Data-flow of Remote MR Othello system

は、正面カメラ側は FGR 社から提供されている Fly-Capture SDK 1.6 Release23 を使用し、HMD 内蔵カメラ側は DirectShow を用いた WDM ビデオキャプチャを使用している。HMD 提示映像のレンダリングには、今回使用しているグラフィックボードに最適なものとして OpenGL 2.0 を採用している。内部の画像処理には部分的に OpenCV 1.0 を使用しており、プログラムのコンパイルには Intel C++コンパイラ Version 9.1 を用いて最適化を行っている。

6.2 パフォーマンス測定結果

このような実験環境化において、本システムの有効性を検証するためのパフォーマンス測定を行った。約 3 分間の実行を行い、前後 30 秒間は人物像なし、間の 2 分間は人物像がある状態で撮影した。図 15 に実行時の CPU 使用率、図 16 に HMD 提示映像のレンダリングフレームレートとレンダリング処理時間、図 17 にデータストリームのビットレートと受信エラー率、図 18 に正面カメラ画像のキャプチャフレームレートをそれぞれ示す。各グラフの横軸は観測時刻であり、スケールは全ての図で合わせてある。

図 16 に示すように、HMD に提示される映像はビデオレート（一般に 20~30 [fps]）でのレンダリングが実現できていた。また、HMD 内蔵カメラからの映像が PC にキャプチャされてから、HMD に表示する映像の生成が完了するまでのタイムラグは 20 [ms] 以内となっており、また HMD からの映像入力と HMD

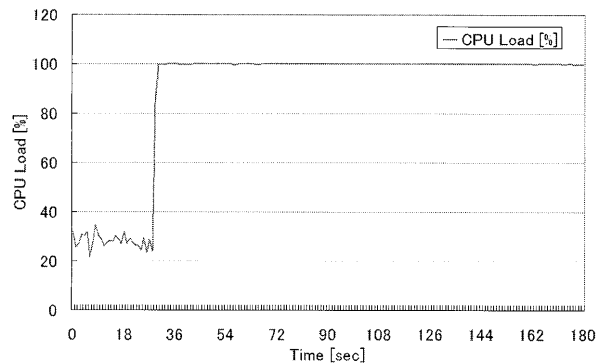


図 15 CPU 使用率
Fig. 15 CPU rate

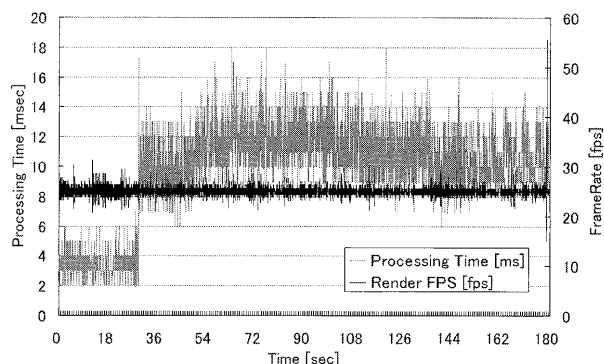


図 16 レンダリングフレームレートと処理時間
Fig. 16 Frame-rate and latency of rendering stage

への映像出力のタイムラグは十分に小さいことから、ユーザの複合現実空間の HMD 提示映像に関しては実時間提示が実現できていることが確認できた。複合現実空間中に提示される遠隔地からの映像における、カメラ映像取得からレンダリングまでのタイムラグは、映像を伝送するネットワーク環境に依存して増減してしまうが、遠隔地のユーザが行ったインタラクションに対する複合現実空間の変化はレンダリングされる人物像とともに伝送されて同じタイムラグで提示されるため、人物像を観察するユーザには、時間遅れが無いように見えていることになる。

ネットワークを通して相手に伝送されたデータストリームのビットレートは、図 17 に示すように、最大でも 4500 [Kbps] 程度となっており、現代のブロードバンドネットワーク環境であれば十分に伝送可能なビットレートが実現できている。また、図 18 に示すように、正面カメラから人物像を取得し、データストリームにエンコードを行って伝送する処理に関しては、12~25 [fps] のフレームレートでの処理が実現できており、ネットワークの通信状態がよく、エラー率が小さ

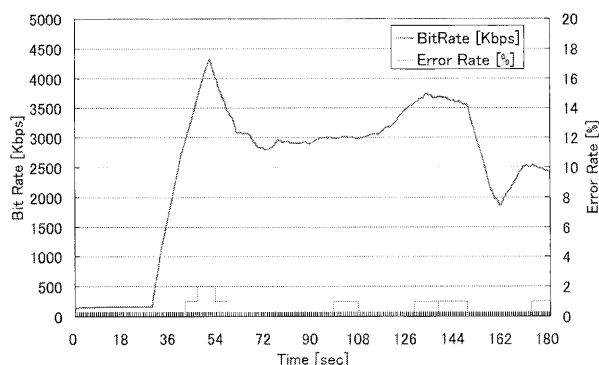


図 17 データストリームのビットレートとエラー率

Fig. 17 Bit-rate and Error-rate of data stream

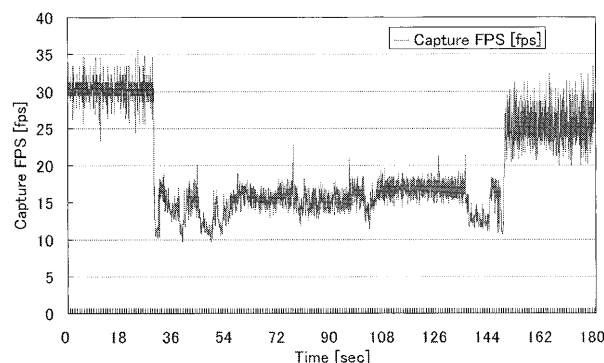


図 18 人物像取得処理のフレームレート

Fig. 18 Frame-rate of capturing stage

ければ、ビデオレートに近いフレームレートでの伝送・提示できていることが確認できた。

7 評価実験

遠隔協調作業における変型ビルボードを用いた人物像の近似提示手法の有効性を、主観評価実験によって検証した。本研究の目的である“あたかも目の前に相手がいるかのような感覚”との比較を行うため、ビデオスルー型 HMD を装着した上で実際に目の前に相手を座らせてその場で作業を行った場合を基準とし、変型ビルボードを含む各種ビルボード用いて提示した場合との差や、人物像の提示の有無などによるパフォーマンスの差の確認を行った。

7.1 パフォーマンス評価

遠隔オセロゲームにおける協調作業を想定して、遠隔地のユーザが行った操作に対する応答時間と操作の正確性を測定することにより、作業効率の比較を行う。インタラクションの内容は、オセロ盤上でオセロの駒を使用する作業を想定し、まず遠隔地のユーザが盤上に白い駒をランダムな場所に打ち、被験者には相手が

打ち終わったと思った瞬間に、遠隔ユーザの打った白い駒の 4 近傍の空いているマス目に自分の持っている黒い駒を打ち返す、という操作を行ってもらう。白い駒が打たれてから黒い駒を打ち返すまでの時間を応答時間とし、HMD 提示映像をビデオ収録しておき、後ほど目視にてビデオ映像を確認し応答時間を計測する。また、打ち返したマス目が誤っていた場合を誤答とする正解率の計測も併せて行う。

比較の対象となるのは、図 19 に示すような六つの提示方式である。全ての提示方式において、被験者には COASTAR 型 HMD を装着させ、両眼視差による距離感が結果に影響しないよう単眼表示モードの映像を通して作業を行ってもらう。(a)の“実体”は、従来の協調型複合現実感でのインタラクションを想定し、被験者の前に実際に相手ユーザが座り同一の盤面に打つ操作を行う。(b)の“変型”は、今回提案する変型ビルボードによる遠隔地ユーザの人物像提示を用いた遠隔協調型複合現実感でのインタラクションであり、被験者の前には、ビルボードにレンダリングされた遠隔地の人物像と、遠隔地のユーザが打った白い駒が打った直後に CG として重畳される。(c)の“曲面”、(d)の“平面”は、それぞれ 2 次曲面ビルボードと傾倒平面ビルボードを用いて人物像をレンダリングした場合である。(e)の“盤面”は、従来関連研究のうちプロジェクタベースの提示手法を想定し、正面カメラ映像を真上から観察した映像になるように 2 次元射影変換を施し、卓上面部分のみに遠隔地ユーザの人物像をレンダリングした場合である。(f)の“駒のみ”は、一般的な遠隔オセロゲームを想定し、オセロ盤上に相手が打った駒の CG だけをレンダリングした場合である。

今回は、前述した白い駒の 4 近傍に黒い駒を打ち返すという試行を、20 代前半の被験者 10 名に、各提示手法で 5 回ずつ行ってもらい、そのパフォーマンスを測定した。

実体と各種ビルボードを比較した結果を示す。図 20 には被験者ごとの 5 回試行の平均応答時間、図 21 には全被験者の平均応答時間と平均正解率として示す。なお、各図中のエラーバーは標準偏差を表す。全体の傾向として曲面ビルボードや傾倒平面ビルボードよりも、変型ビルボードでレンダリングした場合の方が応答時間が早く、実体で行った場合に近い値となっている。また、正解率に関しては、曲面ビルボードと平面ビルボードの場合に大きく低下していることが読み取れる。応答時間について、被験者 10 人×5 回試行の 50 サンプルにて分散分析を行った結果、5%の危険率で有意差が認められた。そこで、4 つの提示手法に対し、Peritz の手法による多重比較を行った [16]。その結果、実体と変型ビルボードとの間と、曲面ビルボー

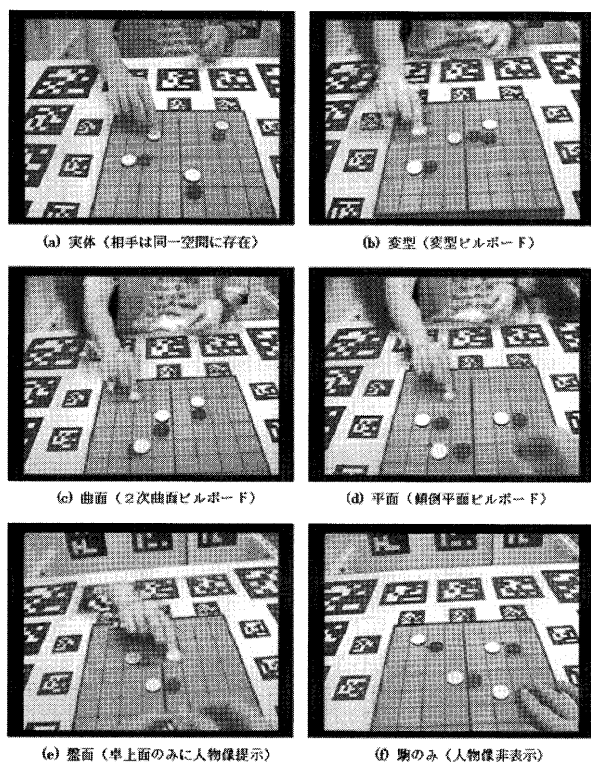


図 19 実験の対象となる提示映像の例

Fig. 19 Examples of user's view of the experiment

ドと傾倒平面ビルボードとの間には有意差が認められず、それ以外の間には5%の危険率で有意差が認められた。

次に、変型ビルボードによる提示、卓上面のみの提示、人物像提示なしで比較した結果を、図22には被験者ごとの5回試行の平均応答時間、図23には全被験者の平均応答時間と平均正解率として示す。この場合でも、全体の傾向として、卓上面のみの提示や人物像提示なしの場合よりも、変型ビルボードによる提示のほうが、応答時間・正解率ともに実体に近い結果を得られたように読み取れるが、応答時間の分散分析の結果は、各提示手法の間で有意差が認められなかった。

これらの結果から、曲面ビルボードや傾倒平面ビルボードのように、相手ユーザの操作している様子が提示される位置が、現実世界の正しい位置に重畳されない場合、円滑なインタラクションを阻害する要因になることが確認された。一方で、正しい位置に重畳される提示手法の間には、反応時間や正解率に関しては明確な差が出ないことが確認された。

7.2 アンケートによる主観評価

前節で紹介したパフォーマンス評価を行った際、各提示手法の試行終了後に5段階評価のアンケート調査を行った。5段階評価は、「明らかに良い」5点、「どちらかといえば良い」4点、「どちらとも言えない」3

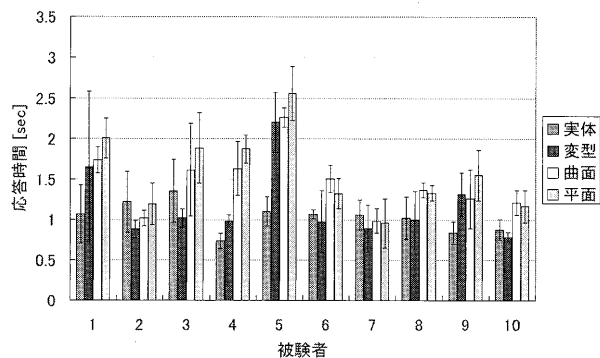


図 20 ビルボード間比較における被験者ごとの結果

Fig. 20 Result of every subject of comparison among three kinds of billboard and real

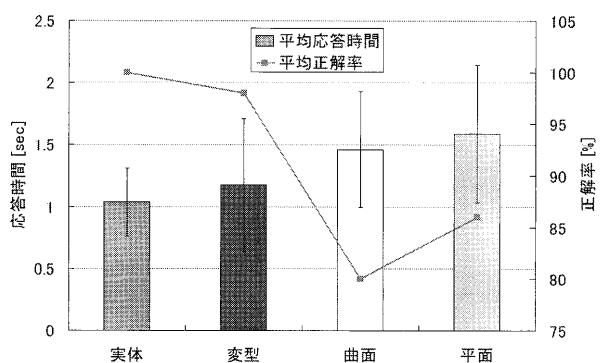


図 21 ビルボード間比較における全被験者平均

Fig. 21 Result of average of all subjects of comparison among three kinds of billboard and real

点、「どちらかといえば悪い」2点、「明らかに悪い」1点となる順序尺度にて評価した。質問項目は、自分が操作する上での操作性、相手が操作している様子を観察する上での視認性、システム全体としての評価として、以下の3項目とする。

1. 自分が駒を置く操作をする上で、その操作のしやすさ
2. 相手が置いた駒を観察する上で、相手の手の位置関係などの見やすさ、分かりやすさ
3. オセロ盤に駒を置くシステム（ないしは対面卓上作業システム）としての使いやすさ

図24に、10人全員の評価値の平均を示す。質問(1)と質問(3)に関しては、どの被験者に関しても大きな差は見られないが、質問(2)に関しては評価値の高いものと低いものとで分かれた。質問項目ごとに分散分析を行った結果、質問(1)と(3)には有意差が認

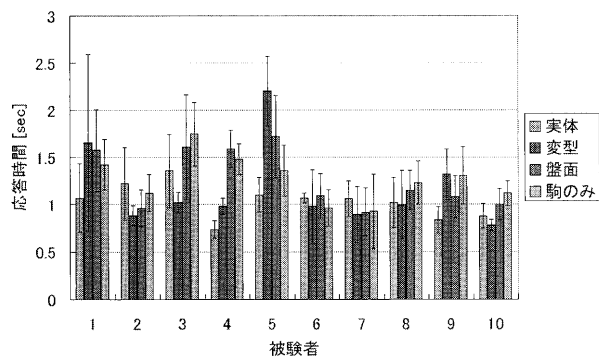


図 22 提示範囲比較における被験者ごとの結果
Fig. 22 Result of every subject of comparison among three kinds of appearance

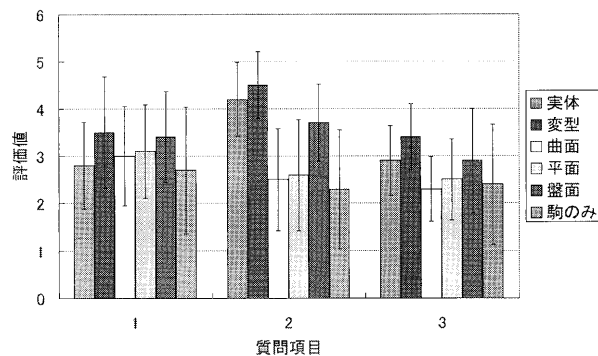


図 24 主観評価実験の結果
Fig. 24 Result of subjective evaluation

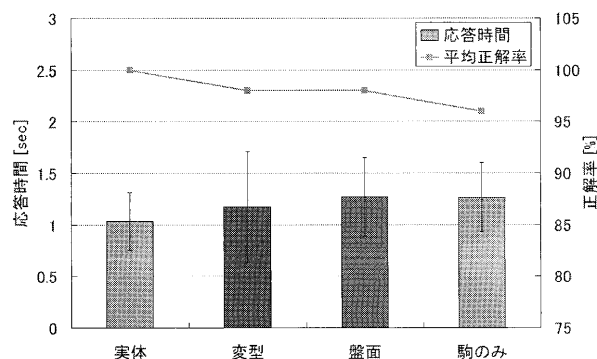


図 23 提示範囲比較における全被験者平均
Fig. 23 Result of average of all subjects of comparison among three kinds of appearance

められなかったが、質問 (2) には 5% の危険率で有意差が認められた。そこで、各提示手法間の多重比較を行った。その結果、曲面ビルボード・傾倒平面ビルボード・人物像提示なしの間、それ以外の提示手法との間にはそれぞれ有意差が認められず、それ以外の組み合わせには 5% の危険率で有意差が見られた。本実験では、全ての質問項目において実体よりも変形ビルボードでの評価のほうが若干高くなっているが、有意差が認められるほどの差ではなかったことから、誤差の範囲と考えられる。

このことから、遠隔地の相手ユーザの人物像提示手法の違いは、自分が操作する上での操作性や、システム全体としての評価には影響しないが、遠隔地の相手ユーザが行った操作の視認性の評価には大きく影響することが確認された。また、パフォーマンス評価同様、人物像全身が提示される場合と、一部しか表示されない場合、まったく表示されない場合との差は明確には現れないことが確認された。

8 まとめ

本研究では、ビデオシースルー型 HMD を用いた協調型複合現実感を遠隔空間に拡張する遠隔協調型複合現実感の提案を行い、対面卓上型協調作業を想定した遠隔協調作業実現の取り組みについて述べた。人物像の取得、伝送、提示の手法に関して注視し、変形ビルボードを用いた人物像の近似提示手法を用いることにより、提示映像の高画質化と同時に、ネットワークで伝送する必要がある情報量とレンダリングのための計算コストの削減を実現した。対面卓上作業の例としてオセロゲームを挙げ、本研究の有効性を検証するための実験システムとして遠隔オセロゲームの構築手法について説明した。

変形ビルボードによる提示手法の有効性の検証として、まずシステムの動作パフォーマンスを測定することで、時間的整合性として重要視される遅延やフレームレートなどの客観的な有効性について確認した。そして、本研究にて提案した変形ビルボードによる近似人物像を人間が観察した場合の主観評価として、変形ビルボードによる近似や人物像提示の有無などによって生じる違和感や作業効率の差を確認し、その妥当性を論じた。

今後の課題として、一つは人物像の抽出制度の向上が上げられる。継ぎ目無く実空間に融合させるためには、背景からきれいに人物像のみを抽出する必要があり、影領域を含めて抽出してしまうことや必要な人物領域が削られてしまうことをできる限りなくさなければならない。こうした研究は、今回提案した手法に限らず様々な分野で未だ研究途上のものであり、今後新たな抽出手法を検討する必要があると思われる。また、もう一つの課題としてインタラクションの幅を広げる必要がある。現在のシステムでは盤上に本物の駒を置くという実物体に対する操作しか実現できていないため、今後ユーザの手の位置や把持動作などを検出し、

仮想物体の駒に対しても操作が可能なインタラクションを実現する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] Y. Ohta, and H. Tamura : Mixed Reality -Merging Real and Virtual Worlds- ; Ohmsha Ltd., (1999)
- [2] K. Kiyokawa, H. Iwasa, H. Takemura and N. Yokoya : Collaborative Immersive Workspace through a Shared Augmented Environment ; In Proc. of SPIE '98, Vol.3517, pp2-13(1998)
- [3] H. Takemura, Y. Kitamura, J. Ohya and F. Kishino : Distributed Processing Architecture for Virtual Space Teleconferencing ; In Proc. of ICAT'93 , pp27-32(1993)
- [4] S. Sugawara, G. Suzuki, Y. Nagashima, M. Matsumura, H. Tanigawa, M. Moriuchi : InterSpace: Networked Virtual World for Visual Communication ; In IEICE transactions on information and systems, E77-D(12), pp1344-1349(1994)
- [5] R. Raskar, G. Welch, M. Cutts, A. Lake, L. Stesin, and H. Fuchs : The Office of the Future: A Unified Approach to Image-Based Modeling and Spatially Immersive Displays ; In Proc. of SIGGRAPH '98, pp179-188(1998)
- [6] J. Mulligan, K. Daniilidis : View-independent scene acquisition for tele-presence ; In Proc. of ISAR2000 , pp105-108(2000)
- [7] K. Kiyokawa, M. Billinghurst, S. E. Hayes, A. Gupta, Y. Sannohe, and H. Kato : Communication Behaviors of Co-located Users in Collaborative AR Interfaces ; In Proc. of ISMAR2002 (2002)
- [8] P. Wellner : The DigitalDesk Calculator: Tangible Manipulation on a Desk Top Display ; In Proc. of UIST '91, pp27-33 (1991)
- [9] H. Kuzuoka, J. Yamashita, K. Yamazaki, A. Yamazaki : Agora: A Remote Collaboration System that Enables Mutual Monitoring ; A CHI'99 Extended Abstracts, pp190-191(1999)
- [10] H. Towles, Wei-Chao Chen, R. Yang, Sang-Uok Kum, H. Fuchs, N. Kelshikar, J. Mulligan, K. Daniilidis, L. Holden, B. Zeleznik, A. Sadagic, and J. Lanier. : 3D Tele-Collaboration Over Internet2 ; In Proc. of ITP2002 (2002)
- [11] K. Daniilidis, J. Mulligan, R. McKendall, G. Kamberova, D. Schmid, and R. Bajcsy : Real-Time 3D Tele-immersion ; In the Confluence of Vision and Graphics, A. Leonardis et al. (Eds.), Kluwer Academic Publishers , pp253-266(2000)
- [12] E. Cooke, P. Kauff, and O. Schreer : Image-Based Rendering for Tele-Conference Systems ; In Proc. of WSCG2002 (2002)
- [13] P.J. Narayanan, P. Rander, and T. Kanade : Constructing Virtual Worlds Using Dense Stereo ; In Proc. of ICCV'98, pp3-10(1998)
- [14] ARToolkitPlus : http://studierstube.icg.tu-graz.ac.at/handheld_ar/artoolkitplus.php
- [15] JIS Z 8729:1994 : 色の表示方法－L*a*b*表色系及びL*u*v*表色系 ; 日本規格協会 (1994)
- [16] 永田靖, 吉田道弘 : 統計的多重比較法の基礎 ; サイエンス社 (1997)

(2008年4月1日受付)

[著者紹介]

南谷 真哉



2004年豊田工業高等専門学校情報工学科卒。2006年豊田工業高等専門学校専攻科情報科学専攻修了。2008年筑波大学大学院システム情報工学研究科修了。同年(株)日立製作所ソフトウェア事業部入社。電子情報通信学会会員。修士(工学)。

北原 格 (正会員)



1996年筑波大学大学院理工学研究科修了。同年シャープ(株)入社。2000年筑波大学先端学際領域研究センター助手, 2003年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)研究員, 2005年から筑波大学大学院システム情報工学研究科講師。コンピュータビジョン, 複合現実感に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE会員。IEEE VR2003 Honorable Mention Award など受賞。博士(工学)。

亀田 能成 (正会員)



1997年京都大学大学院工学研究科博士後期課程研究指導認定退学。同年同大学工学部助手, 1999年同大学総合情報メディアセンター助手。2001~2002年マサチューセッツ工科大学客員研究員(併任)。2002年同大学学術情報メディアセンター助手。2003年筑波大学機能工学系講師。2004年同大学大学院助教授。複合現実感, 自由視点映像, ITS, マッシュセンシング, マルチメディア処理の研究に興味を持つ。電子情報通信学会, 情報処理学会, 画像電子学会, IEEE各会員。博士(工学)。

大田 友一 (正会員)



1977年京都大学大学院博士課程了。京都大学情報工学科助手, 筑波大学電子・情報工学系講師, カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員, 筑波大学電子・情報工学系助教授を経て, 1992年同教授。2004年より, 同大学大学院システム情報工学研究科教授。コンピュータビジョン, 視覚情報メディア, 複合現実感の研究に従事。国際パターン認識連盟フェロー, 電子情報通信学会フェロー, 情報処理学会フェロー。工学博士。