

実物体を用いた MR 空間での遠隔協調作業

坂内 祐一^{†,††} 玉木 秀和^{††} 鈴木 雄士^{††}
重野 寛^{††} 岡田 謙一^{††}

実世界に存在する物を利用するタンジブルユーザインタフェースの研究において、複合現実感 (MR) を利用して実物体とデジタル世界とのシームレスな融合を図ろうという試みがさかんである。本研究ではこの考え方を遠隔協調作業に拡張し、遠隔地に存在するユーザ同士が作業対象となる実物体の複製 (タンジブルレプリカ) を共有して、協調作業を行う対称型遠隔 MR システムを提案する。本システムでは、レプリカに対するインタラクションの過程や結果の共有を複合現実感を用いて実現し、ユーザは 3 次元実物体の触覚を得ながら、独立にレプリカを移動したりポインティングしたりすることができる。遠隔地のレプリカどうしの整合性をとるためにレプリカを基準とした物体座標系を導入し、共有仮想物体を管理する枠組みを実装した。タンジブルレプリカに対するポインティング機能を実装し評価実験を行った結果、1 方向および双方向で、ポイント位置が正確に認識できることが確認された。最後に実物体を介した遠隔コミュニケーション分野での、本コンセプトの適用可能性について述べる。

Remote Collaborative Mixed Reality Using Tangible Objects

YUICHI BANNAI,^{†,††} HIDEKAZU TAMAKI,^{††} YUJI SUZUKI,^{††}
HIROSHI SHIGENO^{††} and KENICHI OKADA^{††}

We propose a remote collaboration system mediated by a tangible replica which each user holds. Virtual objects associated with the replica are overlapped on it using mixed reality, then the user can naturally interact to the replica with the feeling of touch. We implemented a pointing function to the replica, and conducted an experimental evaluation to investigate effectiveness of this function. The result shows that the pointing function works effectively due to the high correct answer rate in reasonable time. Finally, we describe the applicability of our concept to the field of remote communication mediated by tangible objects.

1. はじめに

初期の遠隔協調作業システムとして、ビデオデータとホワイトボードなどの 2D 電子データをやりとりするビデオ会議システム¹⁾ や、参加者のアバタや 3D の仮想物体を共有する VR システムが数多く開発されてきた²⁾。これらのシステムにおいては、共有データは 2 次元ディスプレイ上に表示され GUI を介して操作されるが、ユーザが存在する実空間や実物体の情報を直接扱うことはできなかった。

その後、拡張現実感 (AR) や複合現実感 (MR) により、現実世界の情報を仮想世界へ取り込むことが可能となり、これらの技術を遠隔地間での協調作業へ応

用する試みが行われるようになってきている。

たとえば Real world teleconferencing³⁾ では、ビデオカメラで撮影された遠隔地の参加者の 2D 映像が伝送され、HMD を装着した観察者が自身が存在する空間のマーカ位置に、参加者の 2D 映像が重畳表示されるのを観察することができる。観察者はマーカを移動することによりこの映像を自分が存在する空間の自由な位置に表示させ、あたかも自分の空間に遠隔の人物が同時に存在するかのような印象が得られる。同様なコンセプトである 3D Live⁴⁾ は、被写体となる遠隔の参加者を全周に配置されたカメラで撮影し、これらの映像からリアルタイムに参加者の 3D モデルを生成し、このモデルを観察者のマーカ位置に 3D アバタとして表示するシステムである。

坂内らの作業視点ステレオ映像を共有するシステム⁵⁾ は、作業者と遠隔にいる指示者がともにビデオシースルー HMD を装着し、作業者空間の様子を作業視点の映像により共有することにより作業支援を

† キヤノン株式会社
Canon Inc.

†† 慶應義塾大学理工学部情報工学科
Department of Computer Science and Informatics, Keio
University.

行う。このシステムは、指示者作業間で WYSIWIS を立体視によって実現している点の特徴で、指示者はあたかも遠隔の作業空間に入り込むような感覚で、作業空間のオブジェクトをポインティングして作業指示を行うことができる。

一般的に、同一地点に存在しないユーザ間で複合現実感を利用した協調作業支援システム（遠隔 MR システムと呼ぶ）を構築する際には、どの地点の実空間を対象とするかが大きな問題となる。上記最初の 2 つの例では、遠隔の人物をアバタとして観察者の実空間に配置し、最後の例は作業者の空間を指示者が遠隔から共有するという、役割も機能も非対称なシステムである。このような非対称システムでは、機能が 1 方向に限定されるという制約があるが、ある 1 つの地点の空間（前者では観察者の空間、後者では作業者の空間）をメインにシステムが構築できるので、後述する遠隔地間の空間の整合性は大きな問題にはならない。

これに対して、遠隔地のユーザが各々存在する空間を利用して対称なシステムを構築する場合には、空間の構成や参加者の位置関係などを同一の構造にして、あたかも 1 つの空間を共有しているような状況設定が必要になる。異なるユーザの空間をすべて物理的に同じ構造で実現させるのは現実的ではない。たとえば部分的に実現しても、構造的な整合性を維持するために、さまざまな手段を講じる必要がある。

Com Adapter⁶⁾では、これら空間構造の差異を吸収・整合化するための仕組みを提案している。テレビ、椅子、机の配置構造の異なる部屋にいるユーザ間において、ユーザがテレビをポインティングする動作を、遠隔地の空間でアバタがローカル環境に置かれているテレビをポインティングする動作に置き換えることで、動作を伝えることを試みている。しかしながらこの手法では、実物体に対する操作は考慮されておらず、それぞれの空間に存在する実物体すべてについて、完全な整合化を実現することも現実的には不可能である。

本論文では、各ユーザサイトに作業対象となる 3 次元実物体の複製（レプリカ）を保持し、このレプリカを介して協調作業を行う遠隔 MR システムを提案する。このシステムは、単一のレプリカを操作対象とし、レプリカに対する 3 次元での空間的指示・操作を協調して行うことができ、システム構成およびユーザ操作機能がサイト間で同一な対称型システムである。

特にレプリカがポータブルでユーザが手持ちで作業する形態に適したシステムを構築し、評価実験の結果、有効にポインティング動作可能であることを確認した。

2. 従来研究

没入型の仮想環境（VE: Virtual Environment）である CAVE⁷⁾、CABIN⁸⁾では、遠隔地間でのコミュニケーションが可能であるが、視覚情報によるリアリティ・没入感に力点がおかれ、仮想物体とインタラクションするための位置精度や触覚フィードバックなどの点で、ポータブルなオブジェクトに対する作業支援の有効性は示されてこなかった。

VE の初期の研究から、触覚情報の重要性はすでに認識されており^{9),10)}、Arsenault ら¹¹⁾は、視覚（立体視）に一致した触覚を与えることで、触覚がない場合よりポインティングタスクの実行時間が 12% 向上したことを報告している。また、Lok ら¹²⁾は、VE において仮想オブジェクトへのインタラクションと実オブジェクトへのそれとを比較して、実オブジェクトを用いることの有効性を主張している。

AR/MR を利用した協調作業プラットフォームとして Studierstube¹³⁾がある。対面環境および遠隔環境で、仮想三次元物体を実空間上に表示・共有し、インタラクションすることが可能で、PID と呼ばれるパッドで共有仮想物体の操作を行うインタフェースを備えている。この PID は実体のあるパッドであるが、タンジブルインタフェースの特徴である、オブジェクトの直接操作（direct manipulation）および入出力空間の一体化¹⁴⁾がなされておらず、仮想 3 次元物体に対する触覚も実現されていない。

次に実物体を介した遠隔コラボレーションの研究例を列挙する。

Ishii らは、実物体を用いてデジタル世界とのインタラクションを行うタンジブルインタフェースの遠隔環境への応用を試みている。PsyBench¹⁵⁾は、遠隔で同じ構造の机と机上の実物体を共有するシステムで、それぞれの空間に設置された机の下に電磁石を取り付けた XY ステージを設け、机上の物体の底部にも磁石を配置しておく。一方の空間において机上の物体が動くと、他方においてもそれに相当する物体が同じ動きをとる設計になっており、同じ構造の机を用いて遠隔地間でチェスを行うアプリケーションを開発した。

また Actuated Workbench¹⁶⁾では、PsyBench において、机上の物体がメッシュ上の直線だけしか動けなかったのに対し、より自然な物体の動きを再現し、多数の実物体が同時に操作できるようになったため、より一般的なアプリケーションにも対応可能になった。しかしながらこの 2 つの例では、実物体の動きは机上の 2 次元に限られる。

In Touch は¹⁵⁾、3本の自由に回転するローラの動きを遠隔の同じ構造のローラに伝えることができるシステムである。フォースフィードバック技術により、それぞれのローラと対応するローラが同期制御され、触覚と抵抗力を用いて離れたユーザがその存在を互いに感じることができる。このシステムでは、フィードバック機構によってお互いの気配を感じることができる点が興味深い、具体的な協調作業に用いることは想定されていない。

また Sekiguchi らは RobotPHONE¹⁷⁾ というシステムにおいて、遠隔で互いに所有するディベア型のロボットの動作をインターネット経由で伝え合うことにより、実物体を介した遠隔コミュニケーションを実現している。このシステムでは片方のディベアの左腕を振ると、インターネットで接続されているもう一方のディベアの左腕も同じように動くというような動作の同期をとっている。

以上あげた例では、触覚を得ながら直感的に操作可能であるというタンジブルインタフェースの長所は引き継いでいるものの、一方の実物体の操作を他方へ伝達するために磁石式や機械式のアクチュエータが必要であり、物体の動き・変形などに物理的な制限があるという問題のほか、相手側のアウェアネス情報が少ないため、相手の操作により自分の空間の実物体が予期せぬ動きをするなどの欠点がある。

このほかに遠隔地点を対称に接続することを試みた研究として、以下をあげることができる。

超鏡¹⁸⁾ は、2地点にいる各々のユーザが写っているカメラ映像を1つの映像に合成し、2地点のユーザがあたかも同一空間内に存在するような映像を作り出すシステムである。ユーザはこの合成された WYSIWIS 映像を見ながらコミュニケーションすることができる。超鏡では、ビデオを用いた遠隔地間での対話におけるユーザの一体感の醸成に成功しているが、自身が存在する空間と共有ビデオ映像空間が完全に分離しているため、自身の身体動作が相手にどう見えているかを確認するために、つねにビデオ映像表示画面を見ている必要がある。したがって、オブジェクトを共有して共同作業を行うには不向きである。

山下らは、カメラ映像を用いて2つのテーブルトップを共有して、指示者・作業員間での指示のフィードバックが確立できるシステム AgoraG¹⁹⁾ を開発した。AgoraG は、指示者・作業員の上半身を写すカメラとその映像を表示するディスプレイ、および双方のテーブルトップを写す書画カメラからの映像を合成して表示するモニタディスプレイから構成される。WYSIWIS

環境を実現したこのモニタディスプレイにはタッチセンサが備わっているので、映像上の任意の位置を指示者・作業員双方から直接ポインティングすることが可能である。この機構により、超鏡の身体動作の空間とその結果の表示空間が分離する欠点を解消している。さらにこの仮想共有空間のポインティング情報を現実空間に反映させるためレーザーポインタを用いて、実体の書類の特定の位置を遠隔から指し示すこともできる。

AgoraG と同じように複数のカメラ映像を複数のディスプレイに映し出して、遠隔地間の仮想共有空間を作り出すシステムに Lazy Susan²⁰⁾ がある。このシステムは遠隔地間で同期する回転テーブルを持ち、作業員テーブル上に作業対象となる実物体を配置し、指示者テーブル上には作業員テーブル上の実物体を撮影した映像を投影する。テーブルの回転により容易に視点の変更ができ、かつ相手に自分の視点からのビューを提供することができるのが特徴である。

AgoraG や Lazy Susan では、3次元情報を用いずにカメラ映像から仮想共有空間を生成するため、作業対象が3次元のオブジェクトの場合、特にカメラ奥行き方向に関して空間的な指示が行えないという問題がある。またシステム構成は対称であるが、作業対象となる共有オブジェクトは、作業員サイトのみ実物体が存在し、指示者サイトでは仮想オブジェクトとして表現されているため、共有オブジェクトに対する指示・操作に関して非対称性が存在する。

Distributed Designer's Outpost²¹⁾ は、電子ホワイトボードに付箋紙を張りながら遠隔地のデザイナー同士が Web デザインについて議論するシステムである。電子ホワイトボードの前後にカメラを設置し、付箋紙の映像を撮影して電子データに変換して遠隔地とのデータ共有を実現している。Distributed Designer's Outpost も、付箋紙という2次元のオブジェクトしか扱えないが、実体の付箋紙に対応している仮想の付箋紙の移動が可能である。仮想の付箋紙が移動された場合、実体の付箋紙が存在するサイトに仮想の付箋紙の位置が変化したことを示す警告が表示される。ユーザは、この警告をもとに実体の付箋紙を手で移動して、遠隔地サイトとの整合性をとる必要がある。

これら遠隔地間を対称に接続する従来研究と比較すると、本提案では、作業対象となる単一の3次元実物体オブジェクトを各サイトで保有し、このオブジェクトに対する空間的指示および実体操作をサイト間で独立に行えること、を特徴とした対称システムを実現している。

3. 提 案

2章で述べたように遠隔協調作業において作業対象となる3次元仮想オブジェクトを操作するためには、触覚情報のともなったタンジブルユーザインタフェースがきわめて有効である。

そこで本論文では、作業対象となる実オブジェクトを遠隔で共有するためにタンジブルレプリカ概念を導入し、MR技術を用いて単一のレプリカの空間的位置・姿勢の変化に対応し、ポインタによる指示が行える手法を提案する。なおこのシステムでは、双方向音声通信路は確保されているとし、カメラから入力されたビデオ情報の伝送はいっさい行わない。

3.1 タンジブルレプリカによる作業イメージ

図1(1)に示すように、遠隔地に存在するユーザAとユーザBが無地の白いマグカップを持っており、AとBが共同でこのマグカップの表面の模様をデザインするケースを考える。このマグカップは、同じ大きさ・形状・材質であるタンジブルレプリカとする。マグカップの形状モデルはあらかじめ設定されており、この形状に沿ってCGが描画される。ユーザA、BのHMD、スタイラス、およびマグカップの位置姿勢はリアルタイムで計測されている。

ユーザAとユーザBは図1(2)に示すようにHMDを装着し、センサが装着されているスタイラスペンでマグカップの表面に模様を描いていく。スタイラスがマグカップ表面に触れるとCGで線が描かれていく。これは共有ホワイトボードに複数人でペイントするのと同じ機能をマグカップの3次元の面上で実現したものである。また、スタイラスは、遠隔の空間ではポインタとして表示される。

ユーザは作業にともない、マグカップを動かしながら観察したり、スタイラスで指し示したり、描画したりする。このとき視点位置とマグカップの相対位置関係は常時変化しており、それぞれの位置・姿勢の計測値を用いて観察者視点位置からのCG表示が随時更新される。

遠隔地間では、ペイント情報とポインタ情報のみが共有され、お互いのマグカップの動きは伝えられない。

3.2 タンジブルレプリカ

作業対象物となる実オブジェクトとして、遠隔ユーザが各々同じ大きさ・形状・材質の実物体(これをタンジブルレプリカと定義する)を保持する。このレプリカに対するインタラクション手段としてペンデバイスを用い、レプリカ表面へのペイント機能を備える。このペイントの結果はMR技術を用いてCGとして

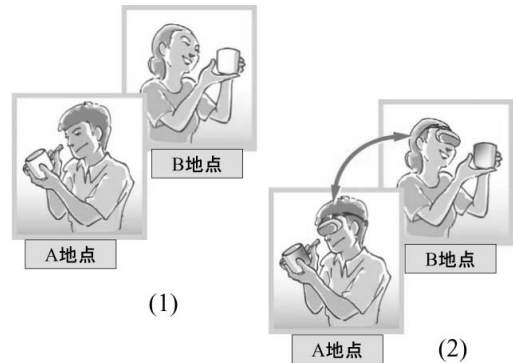


図1 タンジブルレプリカによる遠隔協調作業のイメージ
Fig. 1 An example of remote collaboration using tangible replicas.

レプリカ上に重畳され、かつ遠隔ユーザとの間で共有される。

また上記ペンデバイス位置情報は、ユーザにはポインタとしてリアルタイムに表示されるので、レプリカ表面への位置指定が可能になる。レプリカの位置・姿勢はリアルタイムで管理されているため、レプリカの動きに対応して、ペイント結果やポインタの表示を行うことができる。

以上のような機能を用いて、各ユーザはタンジブルレプリカの触覚を得ながら、注目位置を指示したりペインティングしたりすることで共同作業を行う。なお本提案では、ポインタ以外のユーザの身体情報(視線、手など)は表現されない。またレプリカの形状変化も考慮しない。

3.3 レプリカのポータビリティの実現

共有実物体が各ユーザ空間で固定されている(たとえば、大きくて動かせない)という制約がある場合には、後述するように各ユーザの空間に固定した世界座標系で管理すればよい。しかしながら、遠隔の実物体の位置変更を実現させるためには、Psybenchのようにアクチュエータを付けるか、Distributed Designer's Outpostのように遠隔からの警告に基づいてユーザが手で実物体を移動させる必要があった。

本提案では、作業イメージに示したように作業対象物は1つに限定されるものの、各ユーザが独立に実物体であるレプリカを移動することができるという特徴がある。このモデルでは、積み木部品を使った組立作業など、多数の実オブジェクトを同時に扱う作業には適用できないが、1つの造形物表面の模様をデザインする(マグカップのほかに、こけしの絵付けなど)、またはデザインの教育を行うなどの用途に適していると考えられる。

各サイトのレプリカのポータビリティを実現するためには、刻々移動するレプリカの位置・姿勢を計測して、仮想オブジェクトを視点との整合性をとりながら表示し、かつ作業相手と共有しなければならない。このとき必要な情報は、ユーザ視点、レプリカ、ペンデバイスの相対位置関係である。このような系で、ユーザのレプリカの動きはユーザ視点との相対関係の変化ととらえられる。ローカル環境ではこの動きをユーザ視点位置情報からの見えに反映させる必要があるが、遠隔ユーザには、この情報は必ずしも重要でないで、伝送しない。

すなわち、実物体の動きにより遠隔の実物体を移動するのではなく、遠隔ユーザにレプリカとペンデバイスの相対位置関係を伝えることで、各ユーザの見えの整合性を確保するのである。

以上のことにより、ユーザは遠隔ユーザのレプリカの動きを気にせずに作業が可能になるが、副作用として下記に述べるポイントのビューにレプリカの動きが反映されてしまう点がある。

3.4 ポインタのビュー

ポインタ情報は、相手ユーザのレプリカとペンデバイスの相対位置が保持され送られてくる。したがってこの相対位置が変化すれば、その変化がポインタの動きとして観察される。さらに、相手側でレプリカとペンデバイスの相対位置が変化しない場合でも、自分自身のレプリカを動かすと相手のポインタとの相対位置が変化するためポインタは移動する。

すなわち、ポインタの動きは相手ユーザのレプリカとペンデバイスの相対位置関係および、自身の視点位置とレプリカとの相対位置関係によって変化し、これらの動きが合成された結果として表示されることになる。

たとえば、ユーザが自分自身のレプリカを固定して観察しているときに相手のポインタが移動した場合、相手がレプリカを動かしているのか、ペンデバイスを移動しているかの情報は得られず、単にレプリカとペンデバイスの相対位置が変化したことが分かるだけである。

4. 実装

4.1 世界座標系と物体座標系

MR システムでは実世界に世界座標系が設定され、この座標系を基準に実物体および仮想物体が表現される。MR システムを遠隔に拡張する場合、図 2 に示すように A 地点、B 地点それぞれに世界座標系 W_A 、 W_B が設定される。共有物体はそれぞれの座標系で同

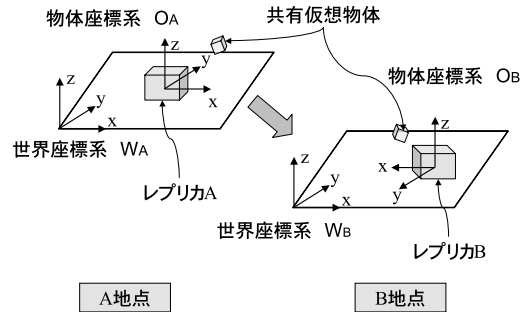


図 2 世界座標系と物体座標系

Fig. 2 World coordinate system and Object coordinate system.

じ座標値をとるようにし、物体の動きなどの状態変更は即座に両地点に反映されるように管理される。

3 章で述べたようなシステムを実現するために本研究では世界座標系に加えて、タンジブルレプリカに対する物体座標系を用いる。すなわち両地点でのレプリカの物体座標系 O_A 、 O_B を設け、レプリカに重畳すべき仮想物体および作業者のペン（あるいはポインタ）位置をこの座標系で表現して双方で共有すればよい。この考え方は特に手に持って動かせる（すなわち世界座標系で移動する）ポータブルな物体で有効である。重くて動かせないようなレプリカを共有する場合は、世界座標系のみで管理できる。

4.2 物体座標系での管理

作業対象物体であるレプリカに重畳される仮想物体は、レプリカを基準とした物体座標系で表示される。このためレプリカを回転・並行移動させると、それにともない仮想物体もつねに相対位置関係を保ちながら同じように回転・平行移動する。この仮想物体の情報は遠隔サイトの作業にも共有される必要があるので、インタラクションの結果の仮想物体は物体座標の値で遠隔地に伝えられ、両サイト間で同期がとられながら、遠隔地のレプリカに対して同じ相対位置関係で表示される。

図 2 に示されるように、サイト A、B では、各々に設定された世界座標系 W_A 、 W_B をもとに仮想物体が表示されているが、レプリカに重畳される共有仮想物体の情報については、レプリカの物体座標から世界座標へ変換され表示される。物体座標系と世界座標系との変換は以下に行われる。

図 2 において、A 地点における物体座標系から世界座標系への変換はモデリング変換行列 M_A を用いて、 $S_{WA} = M_A S_{OA}$ で表される。ここで S_{OA} は A 地点における物体座標系で表される仮想物体で、 $S_{OA} = [x_{OA}, y_{OA}, z_{OA}, 1]^t$ の同次行列で示される。

表 1 仮想物体管理テーブル
Table 1 Virtual objects management table.

仮想物体 ID
仮想物体名
フラグ
変化の種類・度合い

同様に S_{WA} は、仮想物体の A 地点の世界座標系での表現である。 M_A は 4×4 の同次行列である。

A 地点, B 地点のローカルサイトでは, それぞれの世界座標系をもとに仮想物体を管理しているため, 上記のモデリング行列の逆行列を用いて, $S_{OA} = M_A^{-1} S_{WA}$ により A 地点の仮想物体を物体座標系へ変換する。これが B 地点の物体座標系の値に等しい ($S_{OB} = S_{OA}$) のため, B 地点でこの仮想物体の世界座標の位置 S_{WB} は, B 地点でのモデリング変換行列 M_B を用いて $S_{WB} = M_B S_{OB}$ で計算され, この座標をもとに表示される。

4.3 共有仮想物体同期管理

A 地点, B 地点のユーザは各々独立にレプリカを移動させて観察することができる。このときレプリカに重畳されている仮想物体の世界座標系での位置は変化するが, レプリカとの相対位置は変化しないので, 物体座標系での位置は更新されない。

一方インタラクションにより, レプリカと仮想物体の相対位置関係が変化した場合には, 遠隔地の仮想物体の位置も更新されて表示されなければならない。そのため表 1 に示すような仮想物体管理テーブルに, 状態が変化する仮想物体を登録しておく。

状態が変化した場合には, テーブル中のフラグを立て同時に変化の種類とその度合いを記録する。システムの定期的な更新処理の際に, 稼働物体の ID と変化の種類・度合いを遠隔サイトへ送信してフラグをリセットする。受信したサイトでは ID で指定された仮想物体を変化の種類・度合いの情報をもとに更新する。この処理を各サイトで行って相互に送受信することで共有仮想物体の同期を管理している。

4.4 レプリカへの仮想物体の重畳表示

レプリカへの仮想物体の表示にあたっては, ユーザの視点から前後関係が計算され, 矛盾なく見え隠れが表示されなければならない。そのためレプリカの形状をあらかじめ計測してその 3 次元形状モデルを持つ必要がある。この 3 次元モデルを透明なオブジェクトとしてレプリカに貼り付け, リアルタイムで計測されたレプリカの位置姿勢に合わせるようにする。レプリカに貼り付けた透明なオブジェクトと仮想物体の前後判定を行うことで, 作業視点から矛盾のない表示が

可能となる。

4.5 共有仮想物体への制御権管理

共有仮想物体は複数のユーザから同時に操作される可能性があるため, すべての仮想物体に操作権を設け以下 4 つの状態のうちいずれかをとるようにする。

- (1) 誰も操作できない状態
- (2) ユーザ A のみが操作できる状態
- (3) ユーザ B のみが操作できる状態
- (4) どちらのユーザも操作できる状態

これらの状態を遷移させて適当な共有仮想物体の管理を行う。ペンデバイスと仮想物体の接触はリアルタイムで検知できるので, たとえばユーザ A は, ペンデバイスで仮想物体に接触し, ペンデバイスのボタンを押下して仮想物体を把持し, 所望の位置まで移動して, 再度のボタン押下で仮想物体をリリースする動作を行える。この動作にともなう各々のボタン押下のタイミングで, 制御権の状態は (4) (2) (4) と遷移する。状態 (2) の間, ユーザ B はその仮想物体に対して操作を行うことはできない。A, B それぞれが所有するポイントは, つねに所有者のみが操作できる状態になっている (それぞれ状態 (2), (3) に対応)。なお本論文のシステムでは, このポイントの制御権のみが実装されている。

4.6 システム構成

ビデオスルー 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 400 g である。この HMD とスタイラス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。

さらにタンジブルレプリカにも同じタイプのレシーバを固定する。MR Platform (MRP)²²⁾ の機能により, センサからの出力値をもとに仮想物体の CG の描画位置を決定する処理が行われる。HMD 位置・姿勢については, 磁気センサ出力値がさらにマーカにより補正される。

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 (PC1), Pentium4 2.4 GHz (PC2), RAM : 1 GB, グラフィックスボード : nVIDIA GeForce4, OS : Red Hat Linux9 である。

図 3 に示すように A 地点と B 地点では対称なシステム構成となっている。地点ごとの仮想物体の管理は

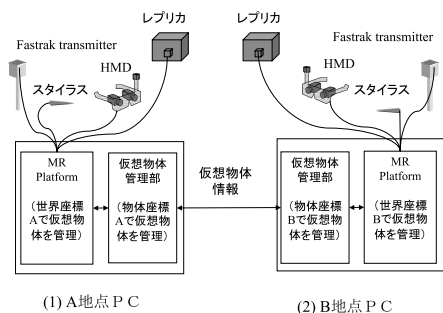


図 3 システム構成

Fig. 3 System configuration.

上述したように MR Platform で行い、共有仮想物の同期管理は、仮想物体管理部において表 1 の仮想物体管理テーブルを用いて行っている。

5. 評価実験

本提案が有効に動作するかを検証するために評価実験を以下の内容で行った。

- 前述したように相手側のポインタの動きは、相手側のスタイラスとレプリカとの相対位置関係の変化と自分自身のレプリカの移動とが合成されて表示されるため、ポインティングが正確に伝わるかという点を調べる。実験 1-1 では 2 人の被験者の役割を固定し、1 方向から指示者がポインティングを行い回答者が答えるまでの時間の計測を行い、実験 1-2 では指示者・回答者が、1 回ごとに交互にポインティング動作を行う双方向のタスクでの上記時間の測定を行い、ポインティング性能を評価する。また実験 1-3 では、比較データとして、ローカル環境において HMD 非装着での実物体へのポインティング動作時間を計測する。
- レプリカが机上に固定されている場合と、本提案のようにレプリカを物体座標系で管理してポータブルなレプリカとして自由に動かせる場合のポインティング時間および応答時間を比較する。

5.1 実験内容

実験に参加した被験者はいずれも 20 歳代前半の男性 10 人、女性 2 人の合計 12 人で、2 人の被験者がペアとなり HMD を装着し、ポインティングを行う指示者とポイントされた点を答える回答者となってもらった。指示者となった被験者が片方の手に持った立方体のタイルをもう片方の手で持ったスタイラスでポイントし、回答者となった被験者も同じように立方体を持ち、指されたタイルの番号を読む。なお指示者システム・回答者システムは同室内に配置して、会話は肉声で行い、お互いの空間が見えないように仕切りを

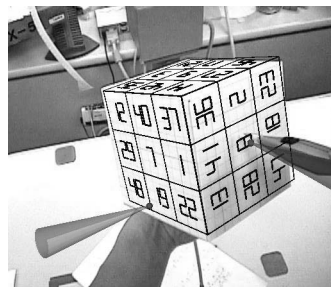


図 4 実験 1 の画面例

Fig. 4 A screenshot of pointing task in experiment 1.

設置した。

評価実験に用いるタンジブルレプリカは、図 4 に示すような 1 辺 12 cm の立方体で、5 面それぞれが 3 × 3 のメッシュ (1 辺 4 cm の正方形) に分割され、その中に 01 から 45 までの数字がランダムに CG で重畳されている。立方体の 5 面をポインティングすることにより特定の軸方向に偏らないポインタの動きを実現するようにした。

5.2 実験 1: ポインティング動作実験

5.2.1 実験 1-1: HMD 装着リモート MR 環境 (1 方向ポインティング)

上述した立方体を用いて指示者が HMD を着用して任意の 5 点を普通の速さでポイントし、HMD を着用した回答者がポイント位置を回答するまでの時間を測定する。

指示者には、ポインティングを行う順番は用意せずに指示者に自由に選択させる。このとき同じ面のタイルを続けて指さないこと、なるべく満遍なく面を指すことに留意してもらった。ポイントするたびに「はい」と言ってもらい、回答者にそのタイルの番号を答えてもらった。回答が得られたら、指示者は次のポインティング動作を行うというサイクルを 5 回繰り返す。

5.2.2 実験 1-2: HMD 装着リモート MR 実環境 (双方向ポインティング)

実験条件は実験 1-1 と同じであるが、指示者が数字を指し示し、回答者から回答を得た段階で役割を交代し、次に回答者が指示者、指示者が回答者となってポインティングを行って回答を得る。この動作を 5 回繰り返して、ペアごとに時間を計測した。

実験 1-1, 1-2 では、回答者の視点映像が映ったモニタをビデオ撮影し、被験者のペアごとに、指示者がポイントして「はい」と言うまでのポインティング時間、および「はい」と言うってから回答者が数字を読むまでの応答時間、および正解率を計測した。

実験 1-1, 1-2 の指示者の様子を図 5 に示す。



図 5 実験 1-1, 1-2 の指示者の様子

Fig. 5 A subject pointing the replica in experiment 1-1, 1-2.

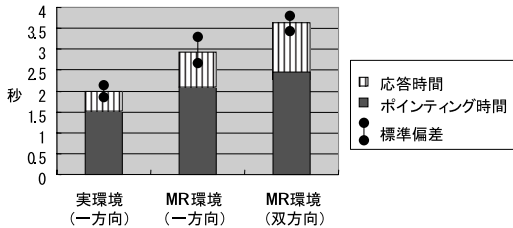


図 6 実環境と MR 環境でのポインティング動作時間

Fig. 6 Pointing time and response time in real and MR environment.

5.2.3 実験 1-3: HMD 非装着ローカル実環境

比較のための実験として、実物体のポインティング時間と応答時間も計測する。図 4 と同じ大きさの立方体にマジックで、上の評価システムと同じ配置に数字を書いたものを用意し、HMD を装着せずに指示者と回答者が同じ空間（ローカル実環境）に存在する状況で上の手順を行った。

指示者は着席した状態で実物の立方体を片手に持ち、もう一方の手にペンを持ってポインティングしていく。回答者は指示者のすぐ後ろに立って、ポイントされたタイルの番号を読んでもらった。このような条件で実験 1-1 と同様の試行回数を行って、ポインティング時間と応答時間を計測した。

5.2.4 実験 1 の結果および考察

4.6 節で述べたシステム構成で、実験中のフレームレートの平均は 26.3 フレーム/秒、遅延は画面から目視できなかった。図 6 に 1 点あたりのポインティング時間および応答時間の平均値を示す。図中央のグラフが、実験 1-1 の条件でのポインティング時間の平均値と応答までを含めた時間の平均値である。前者の値は約 2.1 秒、後者の値は約 2.9 秒（標準偏差 0.56 秒）であった。

図右側のグラフが実験 1-2 双方向ポインティングの場合の結果である。ポインティング時間の平均値は約 2.5 秒、応答まで含めた全体時間の平均値は約 3.6 秒（標準偏差 0.33 秒）で、正解率は 100%であった。こ

の値を実験 1-1 の 1 方向ポインティングの場合と比較すると、ポインティング時間・応答時間ともに長くなっている。

全体時間について両条件の平均値の差を確認するため t 検定を行った。 T 値 $T_1 = 2.56 > T(16, p = 0.05) = 2.12$ となり、有意水準 5% で両条件の平均値に差が見られた。この差は、双方向ポインティングの場合 1 方向ポインティングに比べ、役割変更にもなう動作状態遷移（すなわち、ポインティング動作後の回答動作状態への遷移、および回答後のポインティング動作状態への遷移）に時間を要しているためと考えられる。平均時間が増加した以外、ポインティングタスク遂行時にポインタを見失う状況や、動作の遷移時にコミュニケーションが分断されるなどの混乱は見られなかった。

実験 1-3 のローカル実環境でのポインティングについては、図 6 左のグラフに示されている。ポインティング平均時間約 1.5 秒、ポインティングから応答までの平均時間は約 2.0 秒（標準偏差 0.25 秒）であった。

ポインティング位置の回答の正解率は、各実験 60 回の試行の結果、MR 環境ではすべて正解、実環境では誤りが 1 回あったが、この原因はポインタの先端が手で隠れて見えなかったためであった。

1 方向ポインティング時間を実環境と MR 環境とで比較すると、平均で 0.5 秒の差があるので、 t 検定により両分布の平均値の差を見る。 T 値 $T_2 = 3.19$ で、 $T_2 > T(22, P = 0.01) = 2.82$ となり、有意水準 1% で、両者の平均値には差が認められた。この差は、HMD を着用して作業することによる視野の狭さ、解像度の低さ、仮想物体の重置位置ずれなど複合的な要因によると思われる。

また、応答のみの平均時間は約 0.9 秒で、実物体での応答時間と比較すると 0.4 秒弱程度長くなっている。ポインタ位置を把握するのに HMD を装着して行うため、ポインティング時と同様な要因が影響していると思われる。

撮影したビデオを分析した結果、回答者はつねにポインタの動きを吸収するように、物体をポインタの動きと反対方向に回転させることで相対速度を減速させてつねに自分の視野に入るようにポインタを追従していた。

以上をまとめると、HMD 装着 MR 環境下のポインティング動作において、1 方向の場合、1 点あたり約 3 秒（理想的なローカル実環境の場合約 2 秒）、双方向の場合、約 3.6 秒でポインタ位置を 100% の正解率で確認できた。

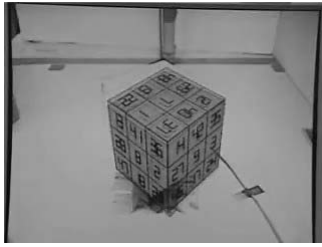


図 7 固定環境での実験画面例

Fig. 7 A screenshot of experiment in fixed condition.

実験 1-1 より，指示者が空間の位置を指示し作業者がその位置を正しく応答し，その応答が指示者にフィードバックされるという，位置指示動作のコミュニケーションプロセス¹⁹⁾が確立されたことが確認できた。

また実験 1-2 より，手順が固定されたポインティング動作において，この位置指定コミュニケーションプロセスが双方向で確立されたことが確認できた。

5.3 実験 2：ポータブル環境と固定環境との比較

実験 2 では，レプリカをポータブルに扱える場合（ポータブル環境）と固定した場合（固定環境）とで，ポインティング時間および応答時間を比較する実験を行う。この実験では，一方の被験者が指示者，他方の被験者が回答者と役割を固定し，指示者のポインティング条件として立方体の底面以外の 5 面上にある 1 点（合計 5 点）をポイントするようにした。

固定環境でのポインティング実験は，タンジブルレプリカを指示者，回答者の机の上に動かないように固定したので，指示者・回答者とも視野に入らない面を見るためには，着席した状態から上体を移動する必要がある。固定環境での実験の映像を図 7 に示す。

ポインティング時間は指示者が動作開始してからポインタを固定して「はい」と回答者に回答を促すまでの時間，応答時間は指示者が「はい」と言ってから回答者が答えるまでの時間である。実験 1 では，正解・不正解にかかわらず次のポインティング動作に推移したが，実験 2 では正解が得られるまで次のポインティング動作を行わないようにして，動作時間のみを評価尺度とした。これらを正確に測るため実験の様子をビデオ撮影して，実験終了後にビデオ再生しながら時間を計測した。

5.3.1 実験 2 の結果および考察

図 8 に 1 点あたりのポインティング時間および応答時間の平均値を示す。ポインティング時間については，固定環境では 3.7 秒，ポータブル環境では 2.7 秒であり，応答時間については前者で 2.0 秒，後者で 1.6 秒であった。ポインティング動作全体では，固定環境で

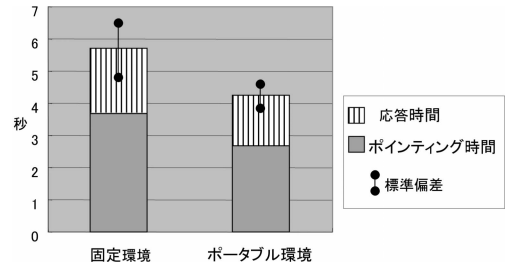


図 8 ポータブル環境と固定環境でのポインティング動作時間
Fig. 8 Pointing time and response time in portable and fixed environments.

5.7 秒（標準偏差 1.55 秒），ポータブル環境で 4.25 秒（標準偏差 0.67 秒）という結果であった。

固定環境では，指示者がレプリカの背面をポイントする場合，中腰または立った状態でポイントし，回答者も同様の姿勢で回答していた。

両環境でのポインティング時間と応答時間の差が統計的に有意であるか， t 検定により両分布の平均値の差を見る。ポインティング時間の差の T 値は $T_p = 2.25$ で， $T_p > T(22, p = 0.05) = 2.07$ であり有意水準 5% で平均値に差が見られた。また応答時間に関しては， T 値 $T_r = 2.08$ で， $T_r > T(22, P = 0.05) = 2.07$ で，ポインティング時間と同様に 5% 水準で平均値に有意差が見られた。

また，ポインティング時間の標準偏差について，ポータブル環境での標準偏差が固定環境のそれと比較してかなり小さいが，ビデオ解析の結果，世界座標系では視野に入っていない部分を観察する場合に姿勢を移動させる必要があり，移動の必要のない場合との時間差が大きかったためであった。

6. 実験のまとめと検討課題

本実験で以下の点が明らかになった。

- タンジブルレプリカを用いて遠隔協調作業を行う場合，各々の作業者のレプリカの物体座標系を用いてポインタをレプリカに対して相対位置表示することで，相手は正確にポインタ位置を確認することができた。
- レプリカが手持ち可能な物体の場合，レプリカの物体座標系を用いたシステムの方が，世界座標系を用いたシステムより効率良くポインティング動作が行えることが判明した。

今後検討すべき課題は以下のようなものがある。

6.1 仮想オブジェクトの拡張

本提案のようにレプリカ物体座標系を用いて共有仮想物体を管理する方法では，レプリカのテクスチャな

どレプリカと一体となっている仮想物体については、表示上何の問題も生じないが、ポインタなどレプリカと独立して動く仮想物体については、レプリカとの相対的な動きで表示されるため、レプリカの動きによって表示位置が変化する。

本評価実験ではポインティング動作のみでの実験を行ったが、双方向からのポインティング動作など複雑な作業中にポインタが用いられる場合、本提案が有効であるかどうかの検証が必要である。また、ポインタ以外にも、視線・手などユーザの身体情報を表す仮想物体は、レプリカの動きによって表示位置が変化する。これら身体情報が追加され頻繁に表示変更された場合に、ユーザに混乱が生じないかを評価する必要がある。

6.2 タンジブルオブジェクトの拡張

本システムでは、同時に共有できるレプリカは1つに限られているが、2個以上のタンジブルオブジェクトを共有する場合には、オブジェクトどうしの位置関係も共有する必要がある。一方のサイトで2つのオブジェクトの相対的位置関係が変化した場合に、これを遠隔サイトのタンジブルオブジェクトの位置関係に反映させる必要があり、一般化するの是非常に困難な問題である。

現実的な解として、3.3節で述べたような造形物表面のデザイン検討など、独立して扱える個別の実物体を対象にするのであれば、共同作業用のオブジェクトをそのつど両サイトで決めて共有していくことで、シリアルに複数のタンジブルオブジェクトを扱うことは可能である。

またレプリカの制限を緩和して、まったく同じ形状・大きさでないタンジブルオブジェクトを共有できる仕組みを作ることも今後の課題である。たとえば、形状が同じでも大きさが異なる物体の共有、ある程度形状が異なっても操作する部分の位置関係が対応付け可能な物体の共有などについて、本コンセプトをもとにモデルを拡張していけば適用できると考えられる。

6.3 物を介したコミュニケーションシステムへ

従来研究で述べた例のほか、実物体を用いて遠隔地にいる人同士の状況を伝えあうシステムとして、つながり感通信²³⁾の研究がある。ここでは、実物体であるファミリーブランドを介して、状況を伝えあい相手とのつながりを感じさせることを目的としている。

この例のような実物体を介した遠隔コミュニケーションの動向を展望すると、実物体と他のメディアをリンクしたさまざまなインタフェースの提案がなされていることから(たとえば文献24))、ユビキタスコンピューティング技術の進展により、コミュニケーショ

ンの手段が、机上のコンピュータからピキタスに存在する“もの”にも拡張されつつあるといえる。

我々が通常利用する「もの」に対して複合現実感により、ビジュアルな情報を付加して、さまざまなコラボレーションシステムへの展開が可能になると予想される。本研究はこの流れの中での1つの枠組みの提案ともいえる。

7. ま と め

本研究では、遠隔協調作業でのタンジブルユーザインタフェースを実現するために、遠隔地のユーザが作業対象であるタンジブルレプリカを保持し、複合現実感を利用してこのレプリカに対するインタラクションの過程や結果を表示する対称型遠隔MRシステムを提案した。

このシステムの特徴は、遠隔地のユーザが3次元実物体の触覚を得ながら、独立に実物体を移動したり、ポインティングしたりすることが可能な点である。これを複合現実感で通常用いられている世界座標系に加えて、物体座標系により共有仮想物体を管理することで、ポータブルな実物体の共有を実現した。

スタイラスによるポインティング機能を実装し評価実験を行った結果、ポイント位置の認識は1方向動作および手順が固定された双方向動作の場合とも、問題なく行われることが確認された。また、ユーザがレプリカを手に持ち、自由な視点から観察できるために、レプリカを固定する場合に比べてポインティング効率が高上がることが判明した。

遠隔地間で実物体を共有することに対して本システムではまだ制限事項が存在するが、本提案は今後進展するであろう実物体を介した遠隔コミュニケーションへの1つのアプローチであると考えられる。

謝辞 本論文の執筆にあたり慶應義塾大学理工学部の宮狭和大氏(現在キヤノン)には大変お世話になった。つつしんで感謝の意を表する。

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) 岡田謙一: サイバースペース上のバーチャルリアリティ協調仮想環境, 情報処理, Vol.42, No.3, pp.236-240 (2001).
- 3) Billingham, M. and Kato, H.: Real world teleconferencing, *CHI '99 Late breaking results*, pp.194-195 (1999).

- 4) Prince, S., Cheok, A.D., Farbiz, F., Williamson, T., Johnson, N., Billingham, M. and Kato, H.: 3-D Live: Real time interaction for mixed reality, *Proc. CSCW '02*, pp.364–371 (2002).
- 5) 坂内祐一, 宮狭和夫, 鈴木雄士, 重野 寛, 岡田謙一: 作業者視点ステレオ映像を共有する複合現実感遠隔作業支援システム, 日本 VR 学会論文誌, Vol.10, No.3, pp.381–390 (2005).
- 6) 磯 和之, 八木貴史, 小林 稔, 岩城 敏, 石橋 聡: 生活融合通信: 空間情報整合化機能, “ComAdapter”, 日本 VR 学会論文誌, Vol.9, No.2, pp.169–178 (2004).
- 7) Cruz-Neira, C., Sandin, J.D., DeFanti, T.A., Kenyon, R.V. and Hart, J.C.: The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment, *Comm. ACM*, Vol.35, Issue 6, pp.64–72 (1992).
- 8) 小木哲郎, 山田俊郎, 栗田裕二, 服部陽一, 広瀬通孝: 仮想空間共有のためのビデオアパタ技術とその利用法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.1, pp.37–46 (2003).
- 9) Hannaford, B. Wood, L. Guggisberg, B., McAfee, D. and Zack, H.: Performance evaluation of a six-axis universal force-reflecting hand controller, *Proc. 19th IEEE Conference on Decision and Control*, Albuquerque, NM, Dec, pp.1197–1205 (1989).
- 10) Sheridan, T.B.: *Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control*, MIT Press: Cambridge, Mass. (1992).
- 11) Arsenault, R. and Ware: Eye-hand coordination with force feedback, *Proc. CHI2000*, pp.408–414 (2000).
- 12) Lok, B. and Naik, S.: Effects of handling real objects and self-avator fidelity on cognitive task performance and sense of presence in virtual environments, *Presence*, Vol.12, No.6, pp.615–628, MIT Press (2003).
- 13) Schmalstieg, D., Fuhrman, A. and Hesina, G.: Bridging multiple user interface dimensions with augmented reality, *Proc. ISAR '00*, pp.20–29 (2000).
- 14) 石井 裕: タンジブル・ビット—情報と物理世界を融合する新しいユーザ・インタフェース・デザイン, *情報処理*, Vol.43, No.3, pp.222–229 (2002).
- 15) Brave, S., Ishii, H. and Dahley, A.: Tangible interfaces for remote collaboration and communication, *Proc. CSCW '98*, pp.169–178 (1998).
- 16) Pangaro, G., Aminzade, D.M. and Ishii, H.: The actuated workbench: Computer controlled actuation in tabletop tangible interface spatial workspace collaboration, *Proc. UIST '02*, pp.181–190 (2002).
- 17) Sekiguchi, D., Inami, M., Kawakami, N. and Tachi, S.: The design of internet-based Robot-PHONE, *Proc. ICAT '04*, pp.223–228 (2004).
- 18) Morikawa, O. and Mawsako, T.: Hyper Mirror: Toward Pleasant-to-use Video Mediated Communication System, *Proc. CSCW '98*, pp.149–158 (1998).
- 19) 山下 淳, 葛岡英明, 井上直人, 山崎敬一: コミュニケーションにおけるフィードバックを支援した実画像通信システムの開発, *情報処理学会論文誌*, Vol.45, No.1, pp.300–310 (2004).
- 20) 上杉 繁, 片山智文, 三輪敬之: 身体の二重的表現手法に基づく空間共有テーブル, *インタラクシオン 2004 論文集*, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, Vol.2004, No.7, pp.263–270 (2004).
- 21) Everitt, K.M., Klemmer, S.R., Lee, R. and Landay, J.A.: Two Worlds Apart: Bridging the Gap Between Physical and Virtual Media for Distributed Design Collaboration, *Proc. CHI2003*, pp.553–560 (2003).
- 22) Uchiyama, S., Takemoto, K., Sato, K., Yamamoto, Y. and Tamura, H.: MR Platform: A basic body on which mixed reality applications are built, *Proc. ISMAR '02*, pp.246–253 (2002).
- 23) 宮島麻美, 伊藤良浩, 渡邊琢美: 社会実証実験によるつながり感通信の効果の検証と分析, *インタラクシオン 2003 論文集*, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, Vol.2003, No.7, pp.271–277 (2003).
- 24) Klemmer, S.R., Graham, J., Wolff, G.J. and Landay, A.J.: Books with Voices: Paper Transcripts as a Tangible Interface to Oral Histories, *CHI '03 CHI letters5 (1)*, pp.89–96, ACM Press (2003).

(平成 18 年 11 月 1 日受付)

(平成 19 年 4 月 6 日採録)



坂内 祐一 (正会員)

1978 年早稲田大学理工学部卒業。
1980 年同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。
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受賞, 日本 VR 学会会員。



玉木 秀和
2006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在学中。複合現実感、グループウェアの研究に従事。



鈴木 雄士
2005年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。複合現実感、グループウェアの研究に従事。2007年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。日本VR学会サイバースペース研究賞受賞。現在、NTTコミュニケーションズ(株)勤務。



重野 寛(正会員)
1990年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業。1997年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。1998年同大学理工学部情報工学科助手(有期)。現在、同大学理工学部情報工学科助教授。工学博士。計算機ネットワーク・プロトコル、モバイル・コンピューティング、マルチメディア・アプリケーション等の研究に従事。著書『~ネットワーク・ユーザのための~無線LAN技術講座』(ソフト・リサーチ・センター)、『コンピュータネットワーク』(オーム社)等。電子情報通信学会、IEEE、ACM各会員。



岡田 謙一(フェロー)
慶應義塾大学理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 研究グループ幹事、日本 VR 学会 CS 研究会副委員長。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。