

# タンジブルレプリカを用いたMR空間での遠隔コラボレーション

坂内 祐一<sup>1,2</sup>, 玉木 秀和<sup>2</sup>, 宮狭 和太<sup>2</sup>, 鈴木雄士<sup>2</sup>, 重野 寛<sup>2</sup>, 岡田 謙一<sup>2</sup>

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, 協調作業を行なう対称型遠隔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(MR)を用いて実現し, ユーザは実物体の触覚を得ながら矛盾なくかつ自然に作業することができる. 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なった結果, 高い正解率でポイント位置が認識でき, 十分実用的であることが確認された. また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.

## A Remote Collaboration System using Tangible Replicas in a Mixed Reality Space

Yuichi Bannai<sup>1,2</sup>, Hidekazu Tamaki<sup>2</sup>, Kazuhiro Miyasa<sup>2</sup>, Yuji Suzuki<sup>2</sup>, Hiroshi Shigeno<sup>2</sup> and Kenichi Okada<sup>2</sup>

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. 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電子データをやり取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なわれるようになっていく.

例えば3D Live[3]は, 被写体となる人物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人物の3Dモデルを生成する. この3Dモデルは遠隔地の観察者に伝送される. HMDを着用した観察者は, この3Dモデルを自分が存在する空間の自由

な位置に表示させることができ, 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印象が得られる.

坂内らの作業視点ステレオ映像を共有するシステム[4]は, 作業者と遠隔にいる指示者が共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行なう. このシステムは, 指示者作業者間で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者空間に入り込むような感覚で, 作業者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なうことができる.

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. 上記の2つの例では, 前者は遠隔の人物を3Dアバタとして観察者の実空間に配置し, 後者は作業者の空間を指示者が遠隔から共有するということから, これらのシステムは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, 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

1. キヤノン(株), Canon Inc.
2. 慶應義塾大学理工学部情報工学科, Dept of Information and Computer Science, Keio Univ.

間)をメインにシステムが構築できるので、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上、例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、実物体の動きなどに多くの制限を加えなければならない。

Com Adapter[5]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そこ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、作業対象となる実物体を中心とする対称型遠隔 MR システムを提案する。本手法において、ユーザは各々作業対象となる同じ大きさ・形状の物体(タンジブル レプリカと呼ぶ)を所有し、このタンジブル レプリカに対してインタラクションを行なう。インタラクション過程および結果は仮想物体としてレプリカに重畳されるので、ユーザは HMD を着用して、これらの情報を確認し共有しながら協調作業が可能である。

本提案は、ユーザインタフェースの観点からは、ユーザが実物体を手に取り触覚を得ながら直感的な操作が可能でタンジブルインタフェースをレプリカによって提供しており、グループウェアの観点からは、作業対象をタンジブル レプリカに限定し MR 技術を利用することにより上記の実空間の整合性の問題を緩和した対称型のシステムを実現している。

## 2. 従来研究

対面環境における協調作業では、同じ空間で同じ実物体に対するインタラクションはごく自然に行なわれるが、遠隔環境では上述したようにユーザの空間が異なるため実物体の扱い方が大きな問題となる。以下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

ラクションを行な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。PsyBench [6]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なうアプリケーションを開発した。

また Actuated Workbench [7]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。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 [6]は、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ですが、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 RobotPHONE [8]というシステムにおいて、遠隔で互いに所有するテ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テ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テ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。

以上挙げた例では、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、物体の動きなどに物理的な制限があるなどの問題の他、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。

この他の例として、Distributed Designer's Outpost[9]は、ホワイトボードに紙の Post-it 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。ホワイトボードの

前後にカメラを設置し, Post-it の映像を撮影して電子データに変換して遠隔地との共有を行なっている。ホワイトボード上での2次元の情報操作に Post-it を用いる点に特徴があるが, 一般的な3次元情報の共有には拡張できない。

また, 触覚情報を他のメディアと組み合わせて伝送して遠隔コミュニケーションを行なうシステムとして Com Touch[10]や Tangible chat[11]がある。Com Touch は指の押圧を検知して入力を行なう入力部5個と, 相手からの入力を感じる振動部5個を手につけ, 音声通信とともに指の動きを触覚で伝える相互コミュニケーションシステムである。

Tangible chat は, キーボードに振動を検知する加速度センサを取り付け, 相手側では振動のデータを音のデータに変換して出力する。

これらのシステムで伝えられるメッセージは, 音声や文字などの言語情報が主であり, その情報を補充あるいは拡張するために非言語情報である触覚情報が用いられている。非言語情報により伝えられるメッセージは非常に抽象的であり, 直接作業に結びつく情報の伝達は困難である。

### 3. タンジブルレプリカによる遠隔コミュニケーション

#### 3.1 利用イメージ

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。

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。A, B同時に書き込んだり消したりすることも可能で, A, Bの操作は双方にすぐに反映されて, これらのペイント情報は常に共有される。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。

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

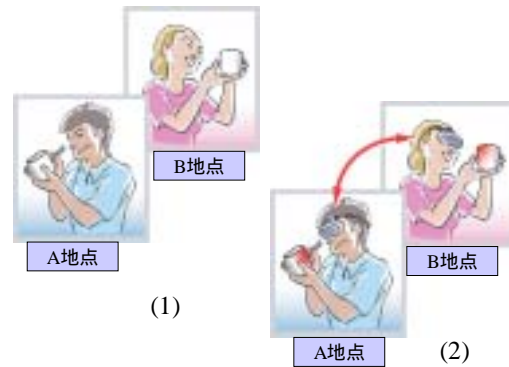


図1 タンジブルレプリカによる遠隔協調作業のイメージ

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。すなわち, Aがマグカップを動かしたときには, Bのマグカップへは何の影響も与えず, BはBの保持している状態でマグカップに模様が描かれているのが観察できる。逆にBのマグカップの動きはAのマグカップに対して何の影響も及ぼさない。

このように遠隔地間でタンジブルレプリカを用いて, それぞれの空間で見えの整合性を保ちながら, そのレプリカへのインタラクションの過程および結果を仮想物体で共有できるのが本方式の特徴である。

#### 3.2 物体座標系

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, それに伴い仮想物体も常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者にも共有される必要があるため, インタラクションの結果の仮想物体はレプリカとの相対位置情報とともに遠隔地に伝えられ, 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系を用いる。物体座標系と世界座標系との変換は以下のように行なわれる。

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、 $S_{WA} = M_A S_{MA}$  で表わされる。ここで  $S_{MA}$  はA地点における物体座標系で表わされる仮想物体で、 $S_{MA} = [x_{MA}, y_{MA}, z_{MA}, 1]^t$  の同次行列で示される。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  $4 \times 4$  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ので、上記のモデリング行列の逆行列を用いて、 $S_{MA} = M_A^{-1} S_{WA}$  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 ( $S_{MB} = S_{MA}$ ) ので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  $S_{WB} = M_B S_{MB}$  で計算され、この座標をもとに表示される。

### 3.3 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。そのために表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常に行なうことで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。

仮想物体ID
仮想物体名
フラグ
変化の種類・度合い

表1 仮想物体管理テーブル

### 3.4 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当たっては、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。そのためにレプリカの形

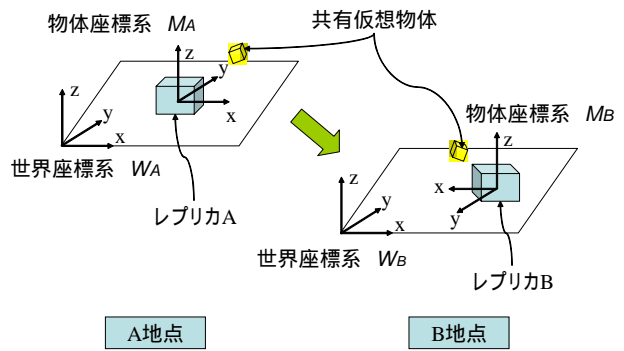


図2 世界座標系と物体座標系

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なうことで、作業視点から矛盾のない表示が可能となる。

### 3.5 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。

- (a) 誰も操作できない状態
- (b) ユーザAのみが操作できる状態
- (c) ユーザBのみが操作できる状態
- (d) 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なう。例えばある仮想物体が最初(d)の状態のとき、ユーザAがその仮想物体に対して操作を行った場合、仮想物体の状態は(b)に変化し、この間ユーザBはその仮想物体に対して操作を行なうことはできない。ユーザAが操作を終えたときに仮想物体の状態は(d)に戻り、どちらのユーザも再び操作可能になる。A、Bそれぞれが所有するポイントは、常に所有者のみが操作できる状態になっている。

## 4. システム構成および特徴

### 4.1 システム構成

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。このHMDとスタイラ

スには磁気センサである Fastrak のレーザーが装着されており、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ーザーを固定する。MR Platform(MRP)[12]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なわれる。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 3.4GHz( PC1 )、Pentium4 2.4GHz( PC2 )、RAM：1GB、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上述したように MR Platform で行ない、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。

#### 4.2 システムの特徴

ここで本システムの特徴を整理しておく。

(a) ユーザは外観形状・大きさが同じタンジブルレプリカを保持して作業を行なう。そのためレプリカの触覚を感じながら作業できる。現システムではレプリカの形状変化を検知する手段・および変形させる手段を持たないため、形状変化は機能の対象外である。

(b) ユーザは視点位置を変えたり自分の意思でレプリカを動かしたりすることができる。これらの動作は相手ユーザのレプリカに対しては影響を及ぼさない。

(c) ユーザはスタイラスを用いてレプリカ上にポインティングやペイントを行なう。レプリカ上に仮想のボタンを設けて、これを押してインタラクティブすることも可能である。インタラクティブ結果の仮想物体の表示は両地点にリアルタイムに反映される。

(d) スタイラスの位置姿勢は共有仮想物体として、相手側のユーザには CG によるポインタとして表示される。このことにより、ユーザは自分のスタイラスと相手のポインタを同時に確認することができる。

(e) ユーザが相手の情報として確認できるのは相手側のポインタ情報のみである。この相手側のポインタは、相手側のレプリカとスタイラス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スタイラ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

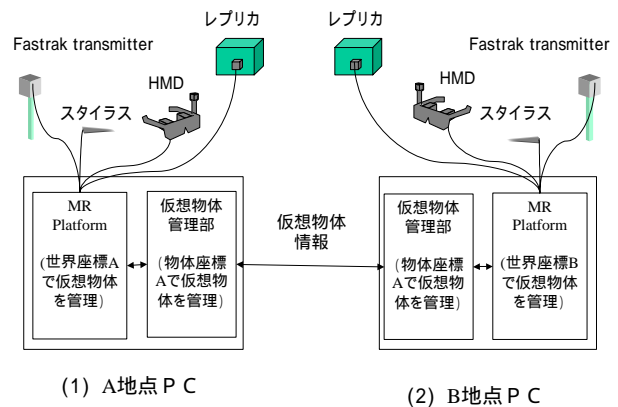


図 3 システム構成

それに連動して相手のポインタ位置も移動する。相手のポインタの動きは、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。

したがって、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、スタイラスを移動しているかの情報は得られず、単にレプリカとスタイラスの相対位置が変化しただけである。

#### 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とおり行なった。4.2 で述べ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、またポインタの動きに不自然さはないかという点を調べることを評価の目的とする。

実験に参加した被験者はいずれも 20 才代で、男性 10 名、女性 2 名の合計 12 名で、2 人の被験者がペアとなり、ポインティングを行なう指示者とポインタされた点を答える回答者となってもらおう。

##### 5.1 実験条件

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 12cm の立方体で、5 面それぞれが 3×3 のメッシュに分割され、その中に 01 から 45 までの数字がランダムに CG で表示される。

2 人 1 組の被験者は HMD を着用し、指示者となる被験者がレプリカを片手に持ち、もう一方の手にスタイラスを持って文字のポインティングを行なう。



図4 評価実験画面例

回答者となる被験者は、ポインタの動きを追従するため自分のレプリカを手にとって動かしながら、ポイントされた数字を回答する。比較のため実物体を用いたポインティングを含めて以下の3つの実験を行った。

(実験1) ポインティング時間の計測

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する時間を測定する。比較のために、CGと同じ並びで数字を描いた実物体をHMD非装着の状態でのポインティングした場合の時間も計測する。

(実験2) 応答時間の計測

指示者と回答者がペアとなり、ポインティングする指示者は、指した瞬間に「はい」と言って回答者に回答を促す。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ない、この動作を5回繰り返す。実験1と同様、実物体を用いた場合の応答時間も計測する。この場合指示者は着席した状態でポインティングし、回答者は指示者の後ろに立って回答する。

(実験3) 相互ポインティングの応答時間の計測

実験1,2では指示者から回答者への一方的なポインティング動作であったが、実験3では被験者双方が交互にポインティングする時間を計測する。ポインティングする被験者が数字を指した瞬間に「はい」と言って他の被験者に回答を促し、次に回答した被験者が指示者となってポインティングする動作を5回繰り返す、時間を計測する。図4で右側のポインタがローカルポインタ、左側のポインタがリモートポインタである。

実験2,3では正解率も記録しておく。なお、指示者、回答者のシステムは同室内に配置して、会話は肉声にて行ない、お互いの空間が見えないように仕切りを設置した。

5.2 実験結果

4.1 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

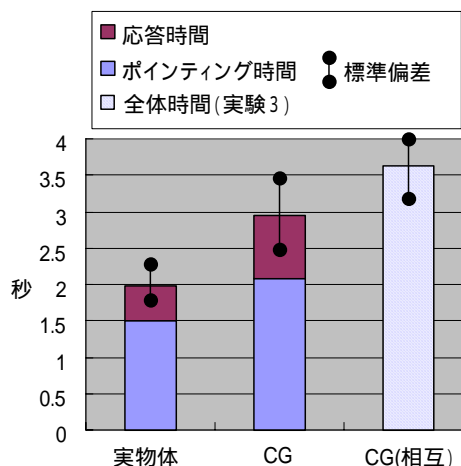


図5 ポインティング・応答時間平均値

きなかった。

図5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、ポインティング時間の平均値(実験1)と、応答までを含めた時間の平均値(実験2)である。前者の値は約2.1秒、後者の値は約2.9秒であった。

実物体へのポインティングについては、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秒であった。

実験3の相互ポインティングでのポインティングから応答までの1サイクルの平均時間は3.6秒であった。標準偏差は、応答までを含めた全体時間の値を図示してある。

ポインティング位置の回答の正解率は、実験2,3でのポインティング回数90回に対して全て正解であった。実物体の場合は60回の試行に対して誤りが1回あった(正解率98%)。誤り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。

5.2 考察

本実験の条件下で、ポインティング時間が約2秒、応答時間が約1秒で、100%の正解率でポインティング先を確認することができた。

ポインティング時間のみを実物体の場合と比較すると、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  $T^*=3.19$  で、 $T^* > T(22, 0.01)=2.82$  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、仮想物体の重畳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を装着して行なうため、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。

実験3の相互ポインティングの平均時間は3.6秒で、実験2より0.7秒長い。これは回答から次のポインティング動作に移るまでの時間である。

これらの結果は、通常のポインティング動作において、相手のレプリカとスタイラスの絶対的な位置（世界座標での位置）がわからなくとも相対関係が表示できれば、ポインタを確認できることを示している。

## 6. 検討課題と今後の展開

### 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。

本論文で述べたシステムについては、インタラクションに必要な最低限な情報としてポインタ表示を行ない、この表示については実験結果からほとんど違和感なく観察されていた。この構成で多くのアプリケーションが構築可能と考えられるが、より一般化するためには、レプリカに関連しない他の仮想オブジェクトの表示方法について考えなければならない。

例えば、相手の視線や身体情報が必要とされるケースでは、タンジブルレプリカの動きによって、これらの身体情報が頻繁に表示変更されるとユーザにとって煩わしいなどの問題が生じる可能性がある。

### 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、タンジブルオブジェクト同士的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、一般化するのは非常に困難な問題である。

現実的な解として、同時に扱えるタンジブルオブジェクトは1つに限定し、共同作業用のオブジェクトをその都度両サイトで決めて共有していくことによって、シリアルに複数のタンジブルオブジェクトを利用す

ることは可能である。

またレプリカの制限を緩和して、全く同じ形状・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今後の課題である。例えば、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、本コンセプトを元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 応用可能性

#### ・モックアップを用いたデザイン

3.1で述べたようなモックアップを共有してデザインを行なう形態の他に、設計図面とそのモックアップ表面についても双方の位置関係の対応が可能なので、設計者(図面)・製作者(モックアップ)の間での検討にも用いることができる。

#### ・3Dエンターテインメント

複数人で一つの物を囲んで楽しむようなゲームを、遠隔地間の参加者がレプリカを共有して楽しむことができる。

#### ・教育システム

同じ紙メディア(例えば本など)を遠隔で共有し、頁や開き具合を実時間で計測することで、ポインティング・アノテーション機能が実現できる。この機能を用いて質問・回答がスムーズに行なえることが期待でき、本の教科書などを共有する教育システムが構築可能である。

#### ・遠隔コミュニケーションシステム

従来研究で述べた例の他、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[13]の研究がある。ここでは、実物体であるファミリープラントを介して、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。Lovelet[14]も同様のコンセプトをモバイル環境で実現したものと言える。

これらの例を拡張して、夫婦・恋人・親子など親しい間でのコミュニケーションにタンジブルレプリカを利用するシナリオも考えられる。例えば夫婦がペアで持っている指輪・写真立て・カップなどは、これらを見れば相手を思い出すようなタンジブルオブジェクトである。これにビジュアルなメッセージを添付して交換できれば、より親密さが増すであろう。

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

さまざまなインタフェースの提案がなされている（例えば[15]など）ことから，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コンピュータからユビキタスに存在する“もの”にも拡張されつつあるといえる．この“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考える．

## 7. まとめ

本研究では，遠隔地間で作業対象となるタンジブルレプリカを共有し，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，遠隔地のユーザが実物体の触覚を得ながら，互いに矛盾がなくかつ自然なインタラクションが可能である．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なった結果，高い正解率でポイント位置が認識され，十分実用的なことが確認された．

現状では，遠隔地間で実物体を共有することに対してシステムの制限事項が多く存在するが，実物体の変形などについて，いくつかの点では拡張可能である．

最後に，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の動向をまとめ，さまざまな場面で本提案の応用が可能であることを述べた．

## 参考文献

- [1] Watabe K., Sakata S., Maeno K., Fukuoka H., and Ohmori T.: Distributed Multiparty Desktop Conferencing System: MERMAID, In Proc of CSCW '90, pp27-38, (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 Vol42, No.3 PP236-240 (2001) .
- [3] Prince S., Cheok A.D., Farbiz F., Williamson T., Johnson N., Billingham M., Kato H.: 3-D Live: Real time interaction for mixed reality, In Proc. of CSCW02, pp364-371 (2002).
- [4] 坂内祐一，宮狭和太，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)
- [5] 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)

[6] Brave S., Ishii H., and Dahley A.: Tangible interfaces for remote collaboration and communication ,In Proc. of CSCW '98 ,pp169-178 , (1998) .

[7] Pangaro G., Aminzade D.M., Ishii H.: The actuated workbench: Computer^controlled actuation in tabletop tangible interface Spatial workspace collaboration: In Proc. of UIST'02, pp181-190 (2002) .

[8] Sekiguchi D., Inami M., Kawakami N., Tachi S.: The design of internet-based RobotPHONE ,In Proc. of ICAT'04 , pp223-228 , (2004) .

[9] Everitt M. K., Klemmer S. R., Lee R., Landay A. J.: Two Worlds Apart: Bridging the Gap Between Physical and Virtual Media for Distributed Design Collaboration, CHI'03, CHI letters5(I), ACM Press pp553-560, (2003).

[10] Chang, A. O'Modhain S., Jacpb R., Gunther E., and Ishii H.: CoMTouch: Design of a vibrotactile communication device, In Proc. of DIS'02, pp312-320,(2002).

[11] 山田裕子，平野貴幸，西本一志：Tangible Chat: 打鍵振動の伝達によるキーボードチャットにおける対話状況アウェアネス伝達の試み，情報処理学会論文誌，Vol.44, No. 5, pp.1392-1403, (2003).

[12] Uchiyama S., Takemoto K., Sato K., Yamamoto Y., and Tamura H.: MR Platform: A basic body on which mixed reality applications are built, In Proc. ISMAR2002, pp246-253 (2002).

[13] 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，インタラクション2003論文集，情報処理学会シンポジウムシリーズ Vol. 2003, NO.7, pp271-277, (2003) .

[14] 藤田英徳，西本一志：Lovelet：離れている親しい人同士のためのぬくもりコミュニケーションメディア，インタラクション2004論文集，情報処理学会シンポジウムシリーズ Vol.2004, No.5, pp.221-222, (2004) .

[15] 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(I), ACM Press pp89-96, (2003) .