

MR空間における準同期的な実物体共有遠隔作業支援

玉木 秀和* 坂内 祐一† 山本 俊* 岡嶋 雄太* 岡田 謙一*

* 慶応大学理工学部

† キヤノン株式会社

遠隔協調作業や遠隔教育において遠隔のユーザ同士が同一の実物体を所持する環境を想定し、遠隔の相手が実物体に対して行った作業や動作の情報を、ユーザが各自の実空間・実物体に基づいて直感的に認識しながら作業や学習ができるシステムを目指す。片方のユーザが実物体を変形させると、その変形の様子が遠隔ユーザの所持する実物体に仮想モデルとしてリアルタイムに表現される。遠隔ユーザはその仮想モデルを自らの所持する実物体を基準として3次元的に直感的に認識可能であり、またその仮想モデルに自らの所持する実物体を動かして合わせることで遠隔ユーザに倣って作業を行い、実物体の状態を共有することができる。この作業を順次行っていくことで遠隔ユーザ同士がそれぞれの実物体を扱いながら作業支援を行うことが可能となる。提案概念を実現するプロトタイプシステムを実装し評価実験を行った結果、仮想モデルに実物体を合わせることで遠隔にいるユーザ同士の実物体の状態を共有可能であることが確認された。

Semi-synchronous Remote Work Support Sharing Real Object in Mixed Reality

Hidekazu TAMAKI* Yuichi BANNAI† Shun YAMAMOTO*
Yuta OKAJIMA* Ken-ichi OKADA*

* Faculty of Science and Technology, Keio University

† CANON Inc.

In this research, our aim is creation of the work support system that allows users, that they can work with awareness of remote user's interaction based on each real object. The deformation is displayed on his or her real object as virtual model in real time, if the other user changes the shape of his or her object in remote place. Users can aware it in three demensions and intuitively based on their real objects, and they can share the statement of real objects by lapping the real objects over the virtual models. Work-support with treating real objects is actualized by doing these process one after another. Then we implemented a prototype system that actualize our concept and evaluated it. As a result, it proved that it is possible to share the statement of real objects in remote places by lapping them over the virtual models.

1 はじめに

これまで遠隔コラボレーションシステムとして、遠隔地にいるユーザの間でビデオデータを通信したり [1] 仮想空間を共有したりするシステム [2][3] が数多く存在したが、これらのものは作業の対象に実物

を用いることはできなかった。特に遠隔作業支援システムにおいては、作業の対象として実際の物を用いることが重要となる。このような場合以前は作業者が実際に実物を作業対象として扱い、それを遠隔にいる指示者が作業者視点映像などを見ながら指示を行うというものが一般的だったが、指示者は実物を扱うことができないので、触覚を得ながらの直感的な作業指示ができなかった。その後遠隔にいる両者が実物を所有した状況で互いの作業を行えるシステムが研究されてきたが、双方の実物や実空間の構

* 慶応義塾大学 理工学部 情報工学科
Department of Instrumentation(Information), Faculty of Science and Technology, Keio University

† キヤノン(株)
Canon Inc.

造を一致させる必要があり各々が自由に対象物を操れなかったり、相手の作業を3次元的かつ直感的に把握することができないなどの問題点があった。

そこで本研究では遠隔のユーザ同士が同一の実物体を所持する環境を想定し、遠隔の相手が実物体に対して行った作業や動作の情報を、ユーザが各自の実空間・実物体に基づいて直感的に認識しながら作業や学習ができる手法を提案する。片方のユーザが実物体を変形させると、その変形の様子が遠隔ユーザの所持する実物体に仮想モデルとしてリアルタイムに表現される。遠隔ユーザはその仮想モデルを自らの所持する実物体を基準として3次元的に直感的に認識可能であり、またその仮想モデルに自らの所持する実物体を動かして合わせることで遠隔ユーザに倣って作業を行い、実物体の状態を共有することができる。この作業を順次行っていくことで遠隔ユーザ同士がそれぞれの実物体を扱いながら作業を進めていくことが可能となる。これにより、ユーザは作業を行なう上で遠隔ユーザの作業をいちいちデスクトップなどで確認する必要もなく、自分の作業対象である実物体に注目しながら直感的に認識できるので、スムーズな遠隔作業支援が実現できると考えられる。

この提案概念を実現するためのプロトタイプシステムを実装しその評価実験を行うことで、システムの精度とユーザフィードバックを考察した。

2 実物体を用いた遠隔作業支援

実物体を用いた遠隔作業支援や遠隔協調作業支援システムにおいて、遠隔ユーザの所有する実物を指し示したりして作業指示をできるものがいくつも研究されている。

筑波大学の葛岡らによる SharedView システムは、遠く離れた場所にいる作業者の空間の情報を共有して指示を与えることができるシステムである [4]。このシステムでは、指示者は、作業者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。このディスプレイと指示者の手の動きを再びカメラで撮影し、作業者の頭部に装着したディスプレイへ送り返すことで、作業者は自分の見ている対象物に対して、指示者の手の動きによる指示を受けることができる。しかし、指示者は実際に作業の対象となるものを触って指示を行うことはできない。

大阪大学の日浦らは、指示の投影にプロジェクタを用いた遠隔指示システムを構築した [5]。作業空間

には、カメラとプロジェクタを接続した PC を複数代用意する。それぞれの PC はネットワークに接続され、遠隔地の指示者側の PC とも接続されている。作業空間でカメラとプロジェクタを用いて3次元形状の計測を行い、得られた距離データとカラー画像を遠隔地に送信することで、遠隔地ではそのデータをもとに生成された CG が画面に表示される。また別途、作業空間の様子を実時間的に把握するため、カメラにより撮影された動画像も表示される。指示者は操作画面上で通常の GUI 操作による指示を行い、その指示データを作業側側の PC に送信する。作業空間の PC は指示データからそれぞれの投影画像を生成し、液晶プロジェクタにより投影するのである。このシステムは液晶プロジェクタより指示を投影するので、作業者が身体に機器を装着する負担なしに自由に作業を行うことが可能である。対象物体の3次元形状が計測されているため、任意の形状の物体上に指示を表示することが可能であり、また遠隔地における作業対象の把握も容易である。このシステムも指示者側は実物体を操作することはできないが、作業指示を相手の実物体上に直接行うことができる。

また、上杉らは遠隔の2人のユーザ間で互いに同期して回転するディスクと、映像表現により双方のテーブル上の情報を共有する機能からなるシステム: Lazy Susan を構築している [6]。このシステムでは、各空間に設置された同じ構造の机上面に同期回転ディスク装置を組み込むことで、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仕組みとなっている。従って、物体の動きを通じて遠隔ユーザによる物体とのインタラクションをアウェア可能となる。それに加えこのシステムでは、テーブルの真上に設置されたカメラからテーブル上でユーザが行う作業の様子を撮影し、遠隔ユーザのテーブル上に投影させる機能を有している。従ってユーザは、ディスクの物理的な動きに加え、テーブル上に投影された遠隔ユーザの手の表示から遠隔ユーザの様子をアウェア可能である。しかしディスク上の実物は遠隔地において仮想物として投影されるため、相手の実物に対する作業指示はジェスチャとバーバル情報に限られる。

3 提案手法

3.1 MR空間における準同期的な実物体共有遠隔作業支援

作業者が実物を用いて作業を行い、遠隔にいる指示者が作業者の視点映像を見ながら作業指示を行うようなシステムでは、作業者は実際に作業対象物に触って触覚を得ながらの直感的な指示が行えない。また双方が実物を所有するような環境では、遠隔間で実物や実空間の構造を一致させなければならないために、片方の実物への操作がもう一方にも影響してしまい、互いに自由な操作ができない。もしくは実物体に対する指示を3次元のかつ直感的に認識することが難しかった。

そこで本研究では、遠隔のユーザが作業対象物として同一の実物体を所持する環境において、MR空間における準同期的な実物体共有遠隔作業支援を提案する。本提案における準同期的な実物体共有とは、ユーザが遠隔ユーザの実物体への作業の様子を自分の所持する実物体を基準として認識した後、自らが遠隔ユーザの動きに倣って作業することで実物体を変形させて実物体同士の状態の同期をとることを表す。本提案を用いた具体的なコラボレーション手順を図1に示す。まず、ユーザが自分の所持する実物体に対して作業を行ない実物体を変形させる。このとき、実物体の変形部分のモデル化をあらかじめ行っておき、変形部分をセンシングする。この情報を遠隔ユーザに送信し、遠隔ユーザの実物体を基準とした位置にリアルタイムで仮想モデルを表示する。遠隔ユーザは仮想モデルの動きにより実物体の変形、すなわち作業の様子を認識し、その仮想モデルに自分の所持する実物体を合わせる。これにより、実物体の状態を共有することが可能となる。さらに本手法を双方向に用いることで、相手が仮想モデルに実物体を合わせる作業もフィードバックされる。このように、ユーザの実物体への作業（ここでは実物体の変形）を遠隔ユーザ側での実物体を基準として仮想モデルで表示することで、遠隔ユーザは相手の作業を自らの扱う実空間・実物体を基準として3次元的に直感的に認識することができる。さらに、仮想モデルに実物体を合わせるという作業を行なうことで、実物体の状態を共有することができる上に、相手の動作に倣って作業を学習することが可能となる。また、相手の実物の変形を表す仮想モデルは双方に表示されるので、指示者側にも作業者がどれだけ正確に指示を読み取り、作業を行えたかというフィー

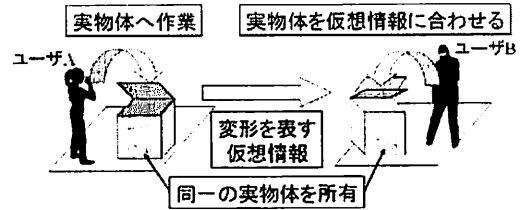


図1: MR空間における準同期的な実物体共有遠隔作業支援

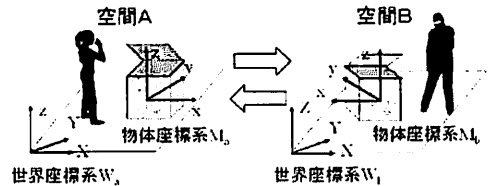


図2: 遠隔間の座標変換

ドバックも得ることが可能である。

3.2 状態共有のための座標変換

遠隔ユーザ側への実物体の変形を表す仮想モデルの表示を実現するために通常の世界座標の他に、図2のようにユーザの持つ実物体のうち変形しない部分の1点を基準とする物体座標系を定める。

このとき、可動部分の動きを遠隔ユーザ側で仮想モデルとして表現するためには次のような座標変換が必要となる。

- 空間 A において可動部分の世界座標系での位置姿勢を物体座標系への位置姿勢へ変換
- 物体座標を遠隔へ伝達
- 空間 B において物体座標系での位置姿勢を世界座標系への位置姿勢へ変換しその位置姿勢に仮想モデルを表示

このとき空間 A での可動部分の世界座標を S_{WA} 、物体座標を S_{MA} とすると

$$S_{WA} = (x_{wa}, y_{wa}, z_{wa}, 1)^T \cdots \cdots (1)$$

$$S_{MA} = (x_{ma}, y_{ma}, z_{ma}, 1)^T \cdots \cdots (2)$$

の同次行列で表される。世界座標系から物体座標系への変換を順方向としたとき、この順方向の変換

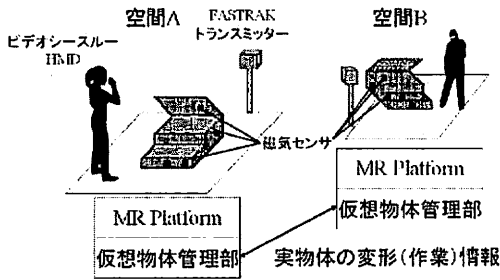


図 3: プロトタイプシステム概略図

処理は、 4×4 の同次行列で表されるモデリング行列 MA を用いて、

$$S_{WA} = M_A S_{MA}$$

で表される。また逆方向の処理は MA の逆行列 M_A^{-1} を用いて、

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

と表すことができる。そこでまず、センシングにより取得した世界座標 S_{WA} から上述の逆方向の処理によって物体座標 S_{MA} を求める。仮想モデルは空間 B においても実物体を基準として表示するので、

$$S_{MA} = S_{MB}$$

となる。仮想物の表示は世界座標を基準に行っているため、空間 B での世界座標への変換

$$S_{WB} = M_B S_{MB}$$

を行い、こうして求めた世界座標の位置姿勢に仮想モデルを表示する。

4 実装

4.1 扱う実物体と作業内容

本提案では遠隔ユーザが同一の実物体を所持する環境を想定しているが、まずは平行移動又は回転移動する可動部分を持つ実物体を扱うこととする。このとき、実物体と実物体の可動部分に関して仮想モデルを用意する。また、実物体への作業としては、その可動部分を回転または平行に動かす作業とし、可動部分の角度と位置をセンシングする。

4.2 システム概要

図 3 に実装したプロトタイプシステムの概略図を示す。図 3 に示されるように、本システムでは作業対象とする実物体に、回転移動する可動部分としてフタ、平行移動する可動部分として引き出しを持つものを用いた。システム内部はローカルの MR 空間における一般的な作業環境を構築するために主に



図 4: 実行画面

デバイスの制御を行う「ローカル MR システム」と、遠隔地で実物体の変形を表す仮想モデルの表示を実現する「仮想物体管理部」の 2 つのオペレーションから成る。実際にフタの開閉を行なっているユーザが HMD で見ている映像を図 4 左側、遠隔のフタの開閉を仮想モデルとして認識しているユーザの HMD の映像を図 4 右側に示す。これらの図を見ると、実物体の可動部分が遠隔ユーザ側では仮想モデルとして表示されていることがわかる。以下で、これらの実装に関して詳しく述べていく。

4.3 ローカル MR システムの実装

ローカルの MR 空間における作業環境を実現した MR システムを構築する手段として、CANON 社が開発した MR Platform を用いた [7]。本実装では MR Platform を利用することで、MR 空間を表示するデバイスとしてビデオシースルー HMD を、現実空間と仮想空間の位置合わせを実現する手段として磁気センサ及びマーカによるハイブリッド手法を、実物体及び実物体の可動部分の位置姿勢をセンシングするデバイスとして磁気センサのレシーバを用いた。

4.4 可動部分のモデル化とセンシング

本システムでは上記の図 3 のように可動部分としてフタ・引き出しを持つような同一の実物体を遠隔ユーザが共に所持する。このとき、フタと引き出し、またそれ以外の実物体の本体部分にそれぞれ磁気センサを貼り付けて 6 自由度の位置姿勢を取得している。この実物体の本体に貼り付けた磁気センサの位置が物体座標系の原点となる。なお貼り付ける位置は実物体同士で全く同じ位置とする。また、フタと引き出しの形状を計測し、OpenInventor を用いて形状・色の酷似した仮想モデルを作成している。

4.5 仮想モデルの同期管理

本提案では可動部分の変化を遠隔側で実物体本体 (に貼り付けた磁気センサ) を基準とした物体座標系に仮想モデルとして表示している。一方の空間で可動部分を動かした場合、実物体本体と実物体の可動部分の相対位置姿勢、すなわち物体座標が変化する

ため、もう一方の空間の実物体本体と仮想モデルの相対位置姿勢も更新する必要がある。この相対位置姿勢の更新は次のような手順で行なった。

- 実物体・仮想物体の登録
- 状態変化の通知
- 遠隔への伝達
- 状態を一致

まず、可動部分の実物体の情報(6自由度位置姿勢・仮想モデル)を予め全て登録しておく。このときに実物体にIDを付け、そのIDからそれぞれフタ・引き出し・実物体本体の位置姿勢をたどることができるようにした。さらに遠隔間で登録する実物体と仮想モデルのIDの整合を取っておく。いずれかの実物体に変化が起こった際、すなわちフタや引き出しの開閉作業が行なわれたとき、その実物体のIDと相対位置姿勢の変化を通知する。通知された変化を遠隔に伝え、遠隔では通知されたIDから仮想モデルを特定する。そして特定された仮想モデルの相対位置姿勢を送信されてきた内容通りに更新する。各地点で実物体の可動部分の状態チェックを常に行い、更新情報を送受信し合うことで、常時実物体の変形と遠隔側での仮想モデルの同期処理を行っている。

5 評価実験

5.1 実験目的

プロトタイプシステムの精度を評価するための実験を行った。また実験と並行して本システムを用いてもらったのユーザフィードバックを得た。

5.2 実験内容

本実験では、遠隔の2地点にいるユーザのうち一人が、実験を実行する実験者、もう一人が実験を受ける被験者という構成で実験タスクを行った。この実験で用いるフタ・引き出しをもつ実物体を厚さ10mmの木の板を張り合わせて作成した。実物体の寸法は図5のようになっている。

実験タスクの概要を図6に示す。まず実験者が任意の角度・位置まで実物体のフタと引き出しを開ける。この動きを遠隔の被験者が仮想モデルで認識し、仮想モデルに自分の所持する実物体を合わせる。このとき、実験者・被験者側のそれぞれの実物体のフタの角度・引き出しの位置を計測し、誤差を算出した。なお、実験における被験者の母集団は21歳から25歳までの男子学生10名である。

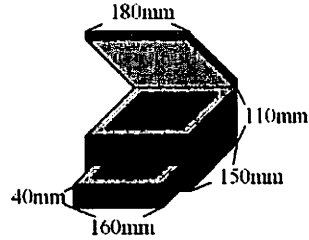


図 5: 実物体の寸法

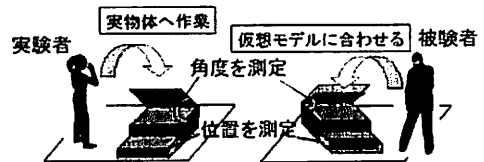


図 6: 実験タスク概要

5.3 実験結果と考察

評価実験の結果は、角度の誤差の平均が2.6度、位置の誤差の平均が0.51cmとなった。これは実験者側の実物体とのずれ度合いとして計算すると、角度に関しては7.8%、位置に関しては7.6%となる。このような誤差が生じた主な原因としては、実物体と仮想モデルのずれによる問題が大きいと考えられる。今回の評価実験で行なったような単純なタスクに関してはある程度誤差が生じても作業の内容は認識可能であるが、より精度の求められる細かい作業に関してコラボレーションを行なうためには実物体と仮想モデルの位置合わせ精度を高める必要があるといえる。位置合わせの精度向上のためにはセンシング精度を高める必要がある。今回の実装では実物体に磁気センサを貼り付けることでセンシングを実現しているが、角度を測るだけであればジャイロセンサを用いる方が高精度の計測が可能になると考えられる。また、仮想モデルに実物体を合わせるという作業に関しては、仮想空間に慣れていないユーザが初めのうちは違和感を感じることもあったが、全てのユーザがすぐに慣れ、スムーズに実物体を仮想モデルに合わせることができた。上述の通り誤差は生じたものの、本システムを用いることで、遠隔間でユーザが同一の実物体を所持する環境において、相手が実物体へ行なった作業(現段階ではフタ・引き

出しの開閉作業)を自分の実空間・実物体を基準としてリアルタイムに3次元的に認識できるようになり、また仮想モデルに実物体を合わせることで遠隔にいるユーザ同士の実物体の状態を共有可能になった。これにより、ユーザは作業を行なう上で遠隔ユーザの作業をいちいちデスクトップで確認することなく、自分の作業対象である実物体に注目しながら直感的に認識できるので、スムーズな遠隔コラボレーションが実現できると考えられる。

6 おわりに

本稿では、遠隔協調作業や遠隔教育において遠隔のユーザ同士が同一の実物体を所持する環境を想定し、遠隔の相手が実物体に対して行った作業や動作の情報を、ユーザが各自の実空間・実物体に基づいて直感的に認識しながら作業や学習ができるシステムを目指し、「MR空間における準同期的な実物体共有遠隔作業支援」を提案した。本手法では、遠隔のユーザ同士が同一の実物体を所持し、片方のユーザが実物体を変形させると、その変形の様子が遠隔ユーザの所持する実物体に仮想モデルとしてリアルタイムに表現される。遠隔ユーザはその仮想モデルを自らの所持する実物体を基準として3次元的に直感的に認識可能であり、またその仮想モデルに自らの所持する実物体を動かして合わせることで遠隔ユーザに倣って作業を行い、実物体の状態を共有することができる。この作業を順次行っていくことで遠隔ユーザ同士がそれぞれの実物体を扱いながらコラボレーションを進めていくことが可能となる。この提案概念を実現するためのプロトタイプシステムを実装し評価実験を行い、システムの精度とユーザフィードバックを考察した。

今後はより位置合わせの精度を向上させることによりコンセプトの有用性を正確に測れるプロトタイプシステムを構築することができるようにするとともに、本提案手法が遠隔間で対称なシステムであるために両者の作業状況のフィードバックをリアルタイムに得られることの有用性を測っていく予定である。

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] Emmanuel F. and Marten S.: "DIVE: A scalable network architecture for distributed virtual environments" Distributed Systems Engineering Journal, Vol.5, No.3, pp.91-100, 1998.
- [3] Fukui K., Miyata A. and Okada K.: "Implementation of Avatar Mediated Communication Environment with Thinking Awareness" SCISISIS2004, THE-7, pp.116-120, 2004.
- [4] Kuzuoka H.: "Spatial Workspace Collaboration: A Shared View Video Support System for Remote Collaboration Capability" In Proc. of CHI '92, pp.533-540, 1992.
- [5] 東城賢司, 日浦慎作, 井口征士: "プロジェクトを用いた3次元遠隔指示インターフェースの構築" TVRSJ Vol.7, No.2, 2002.
- [6] Wesugi, S., Miwa, Y.: "Facilitating interconnectedness between body and space for full-bodied presence - Utilization of Video projection "Lazy Susan" communication system -" Int. Workshop on Presence (Presence2004), pp.208-215, 2004.
- [7] S. Uchiyama, K. Takemoto, K. Satoh, H. Yamamoto, and H. Tamura: "MR Platform: A basic body on which mixed reality applications are built," Proc. IEEE and ACM Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2002), pp.246-253, 2002.