

チェックイン・チェックアウトモデルを適用したMR遠隔協調作業システム

松山 岳史^{†1} 亀井 銀河^{†1}
坂内 祐一^{†2} 岡田 謙一^{†3,†4}

近年、実物体を用いて行う遠隔コラボレーションシステムでは、複合現実感 (Mixed Reality) 技術を用いて、遠隔間でユーザが所持している実物体を機械的な仕掛けなしで状態を共有していくことが実現されている。しかし、これらのシステムは共有するという点を重要としているため、協調作業における相手に見せたくない相手が見たくなかったりする情報を利用できなかった。そこで本研究では遠隔協調作業においても相手に作業を干渉されない個人空間を共有空間と併用できないかと考え、今回「チェックイン・チェックアウトモデルを適用したMR遠隔協調作業システム」を提案する。作業空間に対してMR技術を利用して、これまで共有空間のみであったMR空間に同じ3次元空間として個人空間を構築することで、チェックイン・チェックアウトモデルを空間に適用する。これにより、空間を使い分けて作業ができるようになるため、共有したい情報やタイミングだけ共有できる遠隔協調作業が実現でき、扱える情報や作業の幅を広げることができる。本研究ではこの提案概念を実現するためにシステムを実装し、評価実験によってこの提案手法の有効性を確認した。

Remote MR Collaboration System Adapting Check in/out Model

TAKESHI MATSUYAMA,^{†1} GINGA KAMEI,^{†1}
YUICHI BANNAI^{†2} and KENICHI OKADA^{†3,†4}

Recently, it was realized to share the real object between remote without any mechanical devices by using Mixed Reality technology in remote collaboration using real object. But, in such systems, information that user doesn't want to show or the other user doesn't want to see, couldn't be used because the important point in these systems is only to share. We aim to build the private space which prevents the other user from meddling private work. Then, we propose "Remote MR collaboration system adapting check in/out model". In proposal system, we adapt check in/out model to 3D space to build a private

space in Mixed Reality space by dividing a part of workspace where was a share space. This proposal can realize the remote collaborative work that shares the state only which user want to between remote and expand the kind of work or information which can be used in collaborative system. Then we imply a system that actualizes the concept and evaluated it. As a result, we could prove the efficiency of proposal system advanced rather than usual.

1. はじめに

実物体を用いて行う遠隔コラボレーションシステムは、遠隔間で実物体の状態をどのように同期させていくかが非常に重要となる。近年では仮想世界へ現実世界の情報を取り込むことが可能な複合現実感 (MR) 技術を用いるコラボレーションが研究されている¹⁾。しかしこれまでの研究では、片方のユーザしか実物体を所持できなかったり、両者が実物体を所持するためには機械的な仕掛けが必要だったりした。これらの問題を解決するため、著者らはユーザがお互いに実物体を所有し、その状態をMR技術を利用して遠隔と共有するシステムを実現している²⁾⁻⁴⁾。

これらのシステムは情報を共有するという点が重要であるため、つねにお互いの状態を共有しているものがほとんどである。しかし、協調作業の中には試行段階や自身のみが知りうるノウハウなど、相手が見たくなかったり相手に見せたくない情報も存在し、従来システムではこれらの情報もつねに相手と共有してしまう。この問題の解決手法として、チェックイン・チェックアウトモデルを協調作業において実現する個人空間の構築が研究されているが、これらは主に個人空間を2次元の画面上や仮想空間上に構築したシステムであり、実物体を用いた作業支援システムでは実現されていない。

本研究ではその部分に着目し、「チェックイン・チェックアウトモデルを適用したMR遠隔協調作業システム」を提案する。これは、データベースにおいて古くから研究されている

^{†1} 慶應義塾大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Keio University

^{†2} キヤノン株式会社

Canon Inc.

^{†3} 慶應義塾大学理工学部情報工学科

Department of Computer and Information Science, Faculty of Science and Technology, Keio University

^{†4} 独立行政法人科学技術振興機構

Japan Science and Technology Agency

チェックイン・チェックアウトモデル⁵⁾⁻⁷⁾の考え方を MR 空間上に適用したシステムである。これまで共有空間のみであった空間に個人空間を構築し、共有空間から個人空間に実物体が移動すればチェックアウト、個人空間から共有空間に実物体が移動すればチェックインと定義する。これにより、相手に見られたくない作業を個人空間で行い、相手と共有すべき作業は共有空間で行うといった空間の使い分けができるようになるため、必要なときのみ情報共有できる遠隔協調作業が実現でき、扱える情報や作業の幅を広げることができる。そのため自身のみが知りうるノウハウを扱う作業や互いに戦略を練って行う作業への応用が期待できる。

本稿では、この提案概念を実現するシステムを実装し、評価実験を行うことによって提案手法の有効性を確認する。

2. 関連研究

2.1 実物体を用いた遠隔協調作業

実物体を用いた遠隔協調作業では、対面環境とは違い同じ実物体を共有することは物理的に不可能であるため、遠隔地にある実物どうしの状態をどのように共有させるかが重要な課題となる。

この課題を解決するための手法として、まず機械的な仕掛けによる実物体の状態同期があげられる^{8),9)}。しかしこの場合、実物体の動きはつねに強制的に同期されてしまうため、互いに自由に実物体を動かすことができず、ユーザの動きに大きな制約がかかってしまう。別の手法としては、撮影された作業者の空間の映像を基に状態を同期させる研究がされている。Kuzuoka ら¹⁰⁾による SharedView では撮影された作業者空間の映像に指示情報を加えることで、作業者の空間の情報を共有することができるが、作業者のみしか実物体を所持できないという問題点があった。

著者らはこれらの問題点を解決するシステムとして、MR 技術を用いた実物体の状態同期を行ってきた²⁾⁻⁴⁾。この手法では、MR 技術によって指示者が行った実物体の動きを遠隔の作業側側に仮想物で提示し、作業者がその仮想物に追従して自身の実物体を動かすことで、互いに操作物体を手を持って扱える遠隔作業指示を実現している。

2.2 協調作業における個人空間

個人空間と共有空間という 2 つの作業空間を持つ協調作業支援システムはこれまでも研究されている。Pinelle らはテーブルトップ上で相手からの干渉を防ぐことのできる個人空間を実現することで協調作業の効率化を図っている¹¹⁾。四宮らは共有空間であるテーブルトップ環境と個人空間であるラップトップ PC を統合して利用する協調作業支援システ

ムにより、個人空間で編集作業を行いつつ共有空間で検討作業を行う¹²⁾。Schnadelbach らの Moving Office は、ユーザの Office 空間の映像を MR 技術を利用して仮想空間内に投影する際、投影するか否かを選択することでプライバシーを保護するシステムである¹³⁾。これらは主に 2 次元の画面上や仮想空間上に個人空間と共有空間を構築するシステムであるが、実物体の操作に対してプライバシーコントロールを行うシステムは存在せず、自身のみが知りうるノウハウや試行過程の動きを隠すために個人空間を用いる研究は行われていない。

3. 遠隔 MR 協調作業へのチェックイン・チェックアウトモデルの適用

3.1 遠隔協調作業におけるチェックイン・チェックアウトモデルの重要性

遠隔協調作業は見えない相手と協力して目的を成し遂げなければならないため、相手から情報を守るようなチェックイン・チェックアウトモデルは一見不要のように思える。しかし、そのような協調作業の中にも、相手に干渉されたくない作業が存在している。それらは大きく分けて、「相手が見たくない作業」と「相手に見られたくない作業」の 2 つに分類される。「相手が見たくない作業」は、その作業の結果が直接作業の最終目的にかかわらない作業が該当する。たとえば、本作業に至る前に考えながら行っている準備・試行段階の動きである。この動きはユーザにとっては本作業に至るために必要不可欠な作業ではあるが、協力して作業を行っている相手と一部始終を共有する必要はない。また、作業の合間で休憩しているときの何気ない動きもこれに該当する。相手の作業時に次の作業を想定して何気なく練習していたりすると、その状況が目に入る相手は邪魔に思えて集中力を欠く可能性がある。

「相手に見られたくない作業」は、作業の結果は共有してよいが、作業の過程や使用する要素は隠したい作業が該当する。たとえば、自身のみが知りうる知識やノウハウを使用する作業である。知識やノウハウを使用する場面は相手に知られてはならないが、それを利用した作業結果は相手と共有する必要がある。

このような作業を行っていくためには、相手と基本的には共有しながらも、一時的に相手に干渉されないチェックイン・チェックアウトモデルのような仕組みが必要だと考えられる。協調作業において 2 次元の画面上に個人空間を構築する研究や^{11),12)}、ユーザの空間の映像を共有空間内に投影するか否かを選択できる研究は存在するが¹³⁾、「相手が見たくない作業」や「相手に見られたくない作業」といった実物体の操作を隠し、共有空間において作業結果のみを共有するチェックイン・チェックアウトモデルは存在しない。

3.2 チェックイン・チェックアウトモデルを用いた MR 遠隔協調作業の提案

3.1 節から、共有物体を扱える MR 空間においてチェックイン・チェックアウトモデルを

実現する必要がある。

そこで本研究では、個人空間と共有空間をシームレスにつなぐ MR 遠隔協調作業システムを提案する。これまで共有空間しか存在していなかった遠隔協調作業を行う空間に相手に干渉されない個人空間を新たに併設する。これより、MR 技術を利用することで実空間の性質を切り替えるというコンセプトを提案する。つまり、ある位置に実物体が存在すれば共有空間だが、実物体を移動させることで個人空間に切り替わるというように、実物体の位置によって共有空間・個人空間の性質を切り替える考え方を提案する。ある空間内に個人空間と共有空間が共存するため、空間間の隔たりは境界線のみでハードウェアの隔たりなどは存在せず、空間間の移動は実物体の位置を移動させるだけでシームレスで直観的に行うことができる。また、実物体が共有空間・個人空間のどちらの状態にあるかということを目で見て把握することができ、特に実物体が複数存在するときに有効である。

このような個人空間の構築により、個人空間と共有空間を使い分けて行う協調作業が可能になることから、相手と分担することで互いに集中してスムーズに作業を行う遠隔協調作業が期待できる。また相手に見られたくない作業やデータを利用しながら相手と共有したいときのみ状態を共有できることから、従来より扱える作業やデータの種類に幅を持たせた遠隔協調作業システムの実現も期待できる。

このようなことから本手法の応用例としては、自身しか知りえないノウハウを利用する遠隔協調作業が考えられる。具体的には、複数会社で行う共同デザインや設計計画があげられる。この場合では、共同で 1 つのものに対するデザインや設計を計画していく中で、詳細の部分はお互いに相手に知られたくない自社のノウハウを利用して、それぞれの完成品を持ち寄る必要がある。このような場合には、作業を分担でき、さらにその作業は相手から隠しながら行える、本提案の環境が生きてくる。

3.3 2つの空間の使い分けによる遠隔協調作業

個人空間を共有空間と同一空間に構築することで、協調作業内で利用する空間の使い分けが可能になる。ここでは、図 1 を用いて実際に空間を使い分けた場合の作業例を紹介する。

Site A と Site B は遠隔地で、各ユーザは同型同サイズの実物体とペンデバイスを所持し、色塗りを行う。Site A, Site B のユーザが塗る色はそれぞれ水色、ピンク色である。黄色の空間は個人空間を表し、灰色の空間は共有空間を示す。実物体の上に仮想物を重畳しており、この仮想物に互いの状態を反映することで互いの状態を共有している。状態共有に関しては物体を基準とした共有を行っている。この手法に関しては、3.4 節で述べる。

図 1 (I) は両者が共有空間で作業を行う場合である。共有空間はすべての状態を相手と共

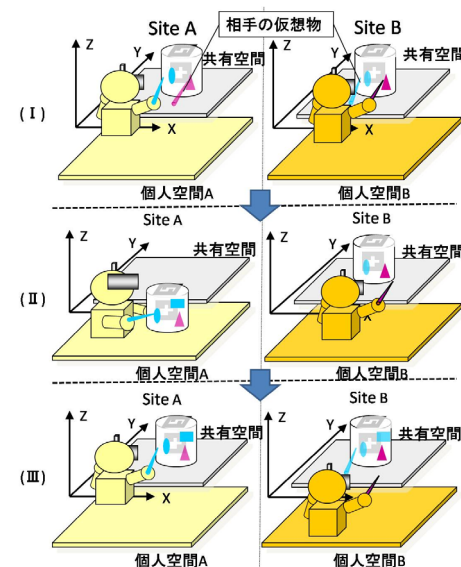


図 1 空間の使い分けイメージ
Fig. 1 How to work in two spaces.

有する空間である。そのため、実物体に対する作業結果はもちろんのこと、実物体に対するデバイスの位置も遠隔側に仮想物として反映されている。

続いて図 1 (II) は、Site A のユーザが個人空間を利用して、Site B のユーザに見せたくない、見られたくない作業を行う場合である。個人空間は相手に干渉されない空間であるため、Site A のユーザが個人空間で行っている作業結果は Site B に反映されず、実物体に対するペンデバイスの仮想物も両 Site に表示されていない。また Site B のユーザが行っている作業に関しても、相手と状態が共有されない。そのため、Site A のユーザは Site B のユーザに邪魔されることなく集中して作業できる。

そしてこの作業後、作業結果を統合しているのが図 1 (III) である。Site A のユーザが実物体を共有空間に戻すことで、Site B にも Site A の作業結果が反映される。このように共有空間に戻ることで、これまで行った作業結果をすべて相手側と共有して、結果の統合を行う。また 1 度共有空間で統合した結果は、その後個人空間へ移動してもお互いに消えることなく保持される。このように統合した作業結果をふまえて、さらなる協調作業を進めていく。

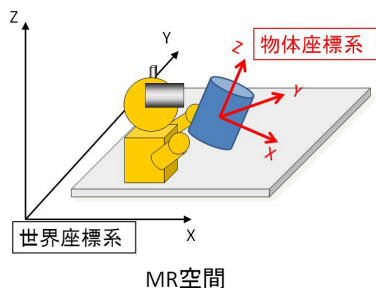


図 2 物体座標系

Fig. 2 Object coordinate system.

3.4 物体を基準とした状態共有

本提案における遠隔との状態共有手法として、空間のある 1 点を基準とする世界座標系ではなく、共有している実物体のうちの 1 つを基準とする物体座標系を利用している (図 2)^{2),4)}。

遠隔間でユーザはそれぞれ同じ形・同じ大きさの操作対象となる実物体を所持している。そして相手の空間には、実物体と同じ形・同じ大きさの仮想モデルを作成する。この仮想モデルは以下の手順で提示される。

- ユーザ A の空間における基準となる実物体の位置姿勢を計測
- ユーザ A の空間における物体座標基準にしたその他の実物体の位置姿勢をユーザ B の空間に伝達
- ユーザ B の空間の物体座標上の同位置姿勢に仮想モデルを提示

これより、基準となる実物体に関しては相手の操作が反映されないため、相手の操作を気にせずに操作できる。そして、その他の実物体に関しても物体座標上で位置座標を共有して相手側にその位置を仮想物により提示することで、互いにどこに作業しようとしているのかを仮想物から理解することができる。この物体座標を用いれば、図 1 のようにユーザが協力して実物体にペンダバイスを用いて色塗りを行う場合、自分の実物体基準に相手のペンダバイスと塗った色が提示される。

4. 遠隔 MR 空間の実装

4.1 システム概要

4.1.1 遠隔 MR システム

本提案を実現するために、2 次元マーカにより位置検出を行う遠隔 MR システムを構築

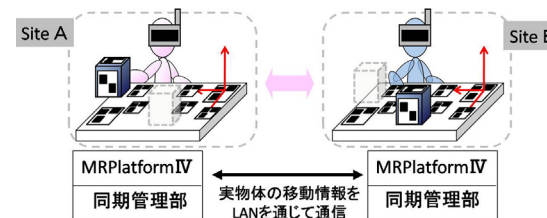


図 3 遠隔 MR システム概略図

Fig. 3 System architecture.

した。このシステムは図 3 に示されるように、キャノン社製の MRPlatformIV に著者らが構築した同期管理部を組み込み、遠隔の 2 地点間で通信を行う。MR 空間を表示するデバイスとしては、両眼ビデオシースルー HMD を用いた。

4.1.2 同期管理部の実装

本提案では作業対象となる実物体を基準とした物体座標系の上で情報を定義し、それを遠隔間で共有している。このためには一方の空間で何らかの変化が起こったときに、同じ変化がもう一方の空間でもリアルタイムに起こらなければならない。つまり、物体基準座標系上の仮想物体の状態を遠隔間で同期させる必要がある。相手の実物体との相対位置姿勢を表現するのに用いる物体座標系上の仮想情報の同期は以下のような流れで行った。

まず、実物体や仮想物体の位置姿勢などの情報をあらかじめすべて登録しておく。このときにすべての実物体と仮想物体に ID を付けることで、その ID からそれぞれの情報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物体の ID の整合をとっておく。いずれかの実物体や仮想物体に変化が起こった際に、その ID と相対位置姿勢の変化を遠隔に通知する。そして通知された情報を更新することで、遠隔との情報共有を実現している。変化するものとしては、回転・平行移動による位置姿勢と後の評価実験で使用される色データを定義した。

4.2 MR 空間における個人空間の構築

MR 空間内での個人空間の構築手法に関して説明する。本提案では、個人空間を共有空間と同一空間に構築する必要がある。そこで図 4 のように MR 技術によって構築される MR 空間内に境界を設けることで、同一空間内での 2 つの空間の構築を実現する。

図中のマーカは MR 空間を構築するためのマーカであり、その中にマーカを貼られた実物体が 2 つ置かれているとする。今回、共有空間と個人空間の境界として MR 空間の基準

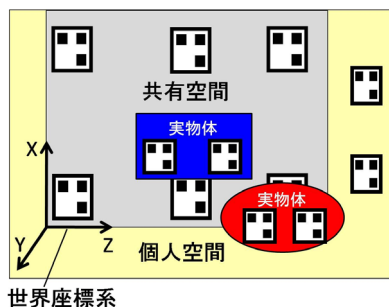


図 4 個人空間を構築した MR 空間の俯瞰図

Fig.4 Image of MR workspace including share and personal spaces.

となる世界座標系の $x-z$ 平面を選択した。そして世界座標系の $x-z$ 平面における第 1 象限の一部を共有空間（図中の灰色の空間）として設定し、それ以外の空間を個人空間（図中の黄色の空間）とした。この空間間の境界には、ユーザが視覚で判断できるように、仮想物を描画している。またどちらの空間で作業を行っているかは、共有している実物体の位置座標で判定している。共有空間内に実物体がおさまりきっていれば、その実物体に対する作業は共有空間で行われていると判定する（図中の青の物体）。しかし実物体の一部が境界を越えていけば、その実物体に対する作業は個人空間での作業となる（図中の赤の物体）。

5. 評価実験

本提案の有効性を確認するために評価実験を行った。評価を行う作業としては、協力的な作業と戦略的な作業の 2 種類を用意し、個人空間がある場合とない場合の両方の作業環境でそれぞれの作業を行った。協力的な作業とは 2 人で協力して 1 つの目的に対して行う協調作業であり、この作業環境では、作業の正確性や相手が邪魔かなどのユーザの利便性に関して評価していく。戦略的な作業とはお互いに必要な情報のみを提供する協調作業であり、この作業環境では相手から隠したいものを隠しているかなどの、ユーザの作業内容の戦略性に関して評価を行っていく。

提案システムの基本的な使い方としては、共有空間で作業を行い、「見たくない作業」「見せたくない作業」を行うときのみ個人空間を利用することを想定しているが、基本的に共有空間で作業を行うタスクにおいて個人空間を併設することの有効性を示すことは困難であるため、評価実験においては個人空間と共有空間を頻りに切り替える作業に焦点を当てている。

5.1 協力的な作業における評価実験

5.1.1 実験方法

今回、相手と協力して行ってもらう作業として、共有する実物体に対して見本と同じように色を塗るタスクを行ってもらった。

被験者は 2 人 1 組で、1 辺 15 cm の立方体とハケを各自所持しており、各実物体には同型同サイズの仮想物が重畳して描かれている。立方体の表面は、各面で 3×3 の 9 つに分割されている。またハケには塗れる色の仮想物が重畳して描画されている。

これを利用して、制限時間 7 分以内で見本どおりの色塗りの完成を目指してもらおう。今回の実験では、協力して色を塗るという要素を含ませるために、各被験者の塗れる色が異なっている。具体的には片方の被験者は赤と黄、もう片方の被験者は青と緑しか塗ることができない。見本に用いる色は赤、黄、青、緑、紫、黄緑の 6 色があり、このうち紫と黄緑は 2 人のユーザが同時に色を塗らなければ作ることのできない色である。被験者は色を組み合わせる工夫も考えながら、見本どおりに色を塗っていく。なお、見本は実物体であり、各被験者の前に置かれている。また、被験者は声でコミュニケーションをとることで、お互いの塗れていない箇所や塗り間違いの箇所を指摘しあうことが可能であるため、協力して作業を行う必要がある。

色塗りは、ハケの面を立方体に当てることで行う。ハケを当てることで、立方体の当たった部分の仮想物の色が変わり、色を塗った状態にできる。塗る色の変え方に関しては、赤と黄を塗れる被験者の場合、1 度目では赤、2 度目では黄、3 度目は白、4 度目は再び赤、といったアルゴリズムで行われる。個人空間がある環境では、被験者に対して事前に個人空間の効果と意義に関して説明を行い、十分に理解してもらった後、実験を実施している。共有空間のみで実験を行う際は相手のハケの動きと色塗りがつねにリアルタイムで共有されるが、個人空間がある場合は個人空間を使うかどうか、いつ作業結果を統合するかなどは、被験者の自由である。

この実験を通じて、提案手法により「相手が見たくない作業」を隠すことで作業効率が上がるのかということの評価をする。色塗りをを行う際、相手のハケの仮想物があると自分の作業に集中できないため、見たくない。個人空間を利用して相手のハケに邪魔されず作業することで、利便性が上がると期待できる。また、個人空間では相手に自分の作業が伝達されないため協調作業には不向きである恐れもあるが、この点に関してアンケートにより確認する。

比較実験には 20 代の男女 20 人を 2 人 1 組にして、10 組の被験者によって行った。それ

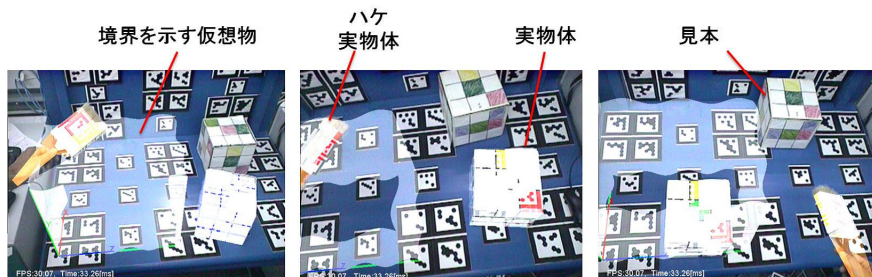


図 5 協力的な作業における被験者の視点映像
Fig.5 Sight in collaborative work.

それぞれの作業環境の実験で、作業終了後に間違い箇所数を記録し、比較実験後に 5 段階評価のアンケートに答えてもらった。図 5 に提案手法を用いたときの作業の進行を示す。図の左は作業が始まる前の状態を表しており、図の真ん中は個人空間内で色塗りを行った状態を示す。図の右は個人空間から共有空間に実物体を移動させ、相手と作業結果を統合した状態を示す。

5.1.2 実験結果と考察

各組の色塗りタスクにおける間違い箇所数を計測した。色を塗らない箇所に誤って色が塗られている場合も間違いと見なしている。間違い箇所数の平均は共有空間のみの場合は 12.9 回、個人空間がある場合は 8.8 回であった。

平均値に対して t 検定を行った結果、両環境間の値に有意差は見られなかった。これは色を塗る箇所を間違えた要因が、作業環境以外にあるためだと考えられる。今回の実験を観察していたところ、相手と作業箇所が重なっていないときでも、ハケを間違った箇所に当ててしまい、色を塗り間違えるケースが目立っていた。つまり今回の色を塗り間違える要因は、相手の仮想物によるものではなく、主に色塗りそのものの難しさによるものであったため、作業環境が異なっても要因が変わらず、間違い箇所数に差が出なかったと考えられる。

また被験者には実験をすべて行った後に以下の 4 つの質問に 5 段階評価でアンケートに答えてもらった。

- 質問 1：相手の仮想物が邪魔ではなかった。
- 質問 2：スムーズな作業ができた。
- 質問 3：相手と協力して作業ができた。

表 1 協力的な協調作業実験におけるアンケート結果
Table 1 Result of questionnaire in collaborative work.

	共有空間のみ	共有空間+個人空間
質問 1	1.10	3.60
質問 2	2.85	3.80
質問 3	3.75	4.20
質問 4	4.20	3.55

- 質問 4：相手の進行状況が把握できた。

4 つの質問のうち、上の 2 つは利便性を問うもの、下の 2 つが協調性を問うものとなっている。評価は質問に対して 1 が“NO”を表し、5 が“YES”を示す。それぞれの質問に対してすべての実験について評価点をつけてもらった。表 1 は全被験者の評価点の平均値を表している。

アンケートの結果に関しては、質問 4 を除いて個人空間があるほうが良い評価点を示した。それぞれの値に関して t 検定を行った結果、質問 1 と質問 2 では有意差があると判定された（有意水準 1%未満）。特に質問 1 の“相手が邪魔ではない”に関しては、提案手法は高い評価点を示している。また感想で、「共有空間のみでは相手の仮想物が煩わしかった」や「個人空間では作業に集中できた」などが得られたことから、個人空間が被験者にとって利用価値があることがうかがえる。協調性の項目の質問 3 と質問 4 では有意差がなかったことから、従来の環境と同様の協調性が保てているといえる。つまり個人空間が存在することでは、相手と協力して作業をするという感覚はつねにすべてを共有している環境と遜色なく存在し、失われることはないといえる。

これらの考察から、提案手法は協調作業の効率を向上させるほどの効果はないものの、ユーザの作業に対する利便性の面において優れている。

5.2 戦略的な作業における評価実験

5.2.1 実験方法

戦略を練りながら行う協調作業として、実物体を利用した立体五目並べというタスクを設定した。

立体五目並べは、共有する実物体のマスに対して 2 人のユーザが交代で色を塗っていき、5 マス連続で自分の陣地を並べれば勝ちというタスクである。そのため被験者は 2 人 1 組であり、使用する実物体は 5.1 節の実験と同様で、各被験者は同様に 1 辺 15 cm の立方体とハケを各自所持している。そしてその実物体に対する仮想物も同様で、立方体の表面は各面で

3×3の9マスに分割され、ハケは色を塗れる側のみ、塗れる色の仮想物が描画されている。各被験者の塗れる色は1色のみで、片方は赤、もう片方が青となっている。これを交代で1マスずつ塗っていき、タスクを進めていく。ターンの交代は音声で伝達する。色塗りの方も5.1節の実験と同様である。ただし、今回塗れる色は各被験者とも単色であるため、1度目の色塗りは自身の持ち色、2度目は元の白色となる。相手が塗った箇所に対しては、重ねて操作できない。5マス連続の定義は今回は縦横のみで斜めは考えておらず、被験者のどちらかが5マス連続で並べた時点でタスク終了となる。

個人空間に関しても、先ほどの実験と同様に、事前に個人空間の効果と意義を理解してもらっている。ただしこの実験では、お互いに個人空間にいる状態ではタスクが進まないため、個人空間を使用した場合は作業後に必ず共有空間に実物体を持っていくことを条件としている。

この実験を通じて、提案手法により必要なときのみ情報を共有することができるかを評価する。立体五目並べでは、戦略を練る過程は相手に知られたくないが、自分の打った手は相手と共有しなければならない。個人空間を利用して戦略を練り、手を打った後に共有空間で情報共有することにより、「相手に見られたくない作業」を隠しながら協調作業ができると期待できる。

比較実験には20代の男女20人を2人1組にして、10組の被験者によって行った。今回は評価項目として各被験者の考慮時間を設定した。考慮時間とは、自身のターンになってから考えた箇所に色を塗るまでの時間であり、これを毎ターン計測して平均値を利用する。それぞれの作業環境の実験で、考慮時間を記録し、比較実験後に5段階評価のアンケートに答えてもらった。図6に提案手法を用いたときの作業の進行を示す。図の左は作業が始まる

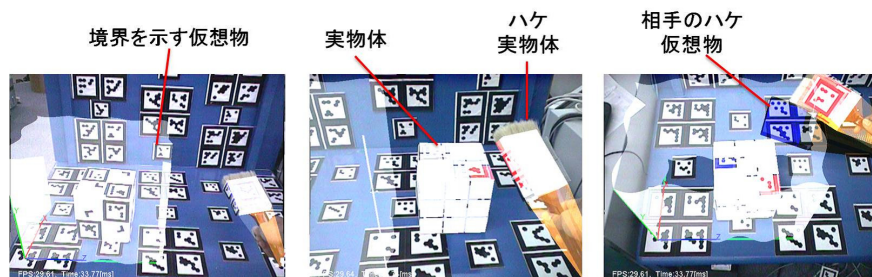


図6 戦略的な作業における被験者の視点映像

Fig. 6 Sight in strategic work.

前の状態を表しており、図の真ん中は個人空間内で1回手を打った状態を示す。図の右は個人空間から共有空間に実物体を移動させ、相手が打った手を共有した状態を示す。

5.2.2 実験結果と考察

測定した各被験者の考慮時間をそれぞれの作業環境で平均した結果、共有空間のみのときは16.67秒、個人空間があるときは35.25秒となった。

考慮時間の結果では、個人空間があるほうが考慮により多くの時間を要していることが分かる。この考慮時間の値は、有意水準1%未満で有意差があると判定された。これは、共有空間では相手がどこに塗ろうとしているかという作業過程を把握できていたため、相手の考えを早く察知することができ、すぐに自身の次の手を考えることができていたが、個人空間が存在することで相手の作業過程が分からなくなり、自身の次の手を相手の作業が終わってから考えなくてはならなくなったためである。このことから個人空間は相手に見せたくない作業を行うのに非常に有効であるといえる。

また被験者には実験をすべて行った後に以下3つの質問に5段階評価でアンケートに答えてもらった。質問は作業の戦略性を問う項目となっている。

- 質問1：相手に隠れて戦略が練れた。
- 質問2：考慮時間が多く必要だった。
- 質問3：相手の考えが不明だった。

評価は質問に対して1が“NO”を表し、5が“YES”を示す。それぞれの質問に対してすべての実験について評価点をつけてもらった。

アンケートの結果に関しては、すべての項目において個人空間があるほうが評価点が高くなるという結果になり、この差はすべて有意水準1%未満で有意差があると判定された。特に質問1の“隠れて戦略を練れた”は最も差が開いた結果となったが、これは感想でも「個人空間があることで隠れて仕掛けを作れた」や「相手の戦略が分かりにくくなった」などが得られていることから、提案環境の戦略を含む協調作業に対する高い適性がうかがえる。また質問3でも有意差を得られたことから、相手の作業過程が不明だったことがうかがえ、

表2 戦略的な協調作業実験におけるアンケート結果
Table 2 Result of questionnaire in strategic work.

	共有空間のみ	共有空間+個人空間
質問1	2.05	4.35
質問2	2.25	4.05
質問3	1.60	3.75

本提案手法は自身のみが知りうる知識やノウハウを使用するときに個人空間を利用し、共有空間で作業結果のみを統合しながら協調作業を行う場面での利用が期待できる。

提案環境は情報の秘匿性を持ちながら、遠隔協調作業も不自由なく行っていることから、自身のみが知りうる知識やノウハウなどの相手に見せたくないものを含みながら必要な情報のみを共有して行う遠隔協調作業を実現できる環境であるといえる。

6. おわりに

遠隔コラボレーションシステムでは、実物体をどのように状態同期させるかが重要であるため、MR 技術を用いることで実物体の状態を扱う手法などが研究されている。しかし協調作業には相手に見せたくない情報なども存在するが、従来の研究では、扱える情報や作業が制限されてしまう。

そこで本稿では、「チェックイン・チェックアウトモデルを適用した MR 遠隔協調作業システム」を提案した。これまでは共有空間しかなかった MR 空間に新たに個人空間を併設することで、同一の 3 次元空間に相手から干渉されない個人空間を構築する。これにより、個人空間と共有空間の両方で同じ実物体を扱え、また両空間間の移動もシームレスに行えるようになるため、共有したいときのみ共有できる遠隔協調作業が実現でき、扱える作業の幅が広がることが期待できる。

本提案を実現するシステムを実装し、提案手法の遠隔協調作業における有効性を検証した。実験は共有空間のみしか存在しない環境との比較実験で、検証する作業としては協力的な協調作業と戦略的な協調作業の 2 種類を用意して行った。この実験からユーザの利便性の向上や戦略的な協調作業への適性を確認できる結果が得られ、チェックイン・チェックアウトモデルを適用した MR 遠隔協調作業システムによる有効性を確認することができた。

今後の展望としては複数人で並行して作業する際に、作業結果の競合が発生する場合について議論したい。チェックアウトと同時にロックして排他制御を行う方法や、チェックインの際に競合箇所を提示する方法、あるいは個人空間から共有空間に移動する際にバックアップを作成する方法など様々な方法が考えられるが、状況に応じてどのような方法を用いるべきかを考えたい。

参 考 文 献

- 1) Wesugi S. and Miwa Y.: Facilitating interconnectedness between body and space for full-bodied presence – Utilization of Video projection “Lazy Susan” communi-

- cation system, *Int. Workshop on Presence (Presence 2004)*, pp.208–215 (2004).
- 2) 玉木秀和, 坂内祐一, 山本 峻, 岡嶋雄太, 岡田謙一: MR 空間における準同期的な実物体共有による遠隔作業支援, *VRSJ*, Vol.12, No.4, pp.529–536 (2007).
- 3) 岡嶋雄太, 松山岳史, 坂内祐一, 岡田謙一: 視点座標を基準にした遠隔作業指示, 情報処理学会論文誌「サイバーコミュニケーション環境を実現するネットワークサービス」特集, Vol.51, No.2 (2010).
- 4) 岡嶋雄太, 山本 峻, 坂内祐一, 岡田謙一: 遠隔ユーザの注意を作業物体上に反映する MR 遠隔コラボレーション, 日本 VR 学会論文誌特集号, Vol.14, No.2, pp.185–192 (2009).
- 5) 鬼塚 真, 磯部成二: 長期トランザクションにおけるチェックイン・チェックアウトの自動化と短期トランザクションの実行順序の保障方式, 情報処理学会研究報告データベース・システム研究会, Vol.97, No.7, pp.33–40 (1997).
- 6) 村永哲郎, 守安 隆, 友田一郎, 水谷博之: ハイパーメディアに基づく共同文書作成環境 MuHyme, 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.6, pp.1395–1405 (1993).
- 7) 市村 哲, 松浦宣彦, 岡田謙一, 松下 温: レイヤ構造と PilotCard 機構に基づく協同作業支援データベース, 情報処理学会論文誌, Vol.33, No.9, pp.1152–1160 (1992).
- 8) Brave, S., Ishii, H. and Dahley, A.: Tangible interfaces for remote collaboration and communication, *ACM CSCW'98*, pp.169–178 (1998).
- 9) Sekiguchi, D., Inami, M., Kamakami, N. and Tachi, S.: The Design of Internet-Based RobotPHONE, *ICAT*, pp.223–228 (2004).
- 10) Kuzuoka, H.: Spatial Workspace Collaboration: A Shared View Video Support System for Remote Collaboration Capability, *Proc. CHI'92*, pp.533–540 (1992).
- 11) Pinelle, D., Barjawi, M., Nacenta, M. and Mandryk, R.: An Evaluation of Coordination Techniques for Protecting Objects and Territories in Tabletop Groupware, *CHI 2009*, pp.2129–2138 (2009).
- 12) 四宮 龍, 小川剛史, 清川 清, 竹村治雄: テーブルトップ型協調作業環境における動的なグループ構成に対応した情報共有手法の実装, 電子情報通信学会技術研究報告, *MVE2008*, Vol.108, No.226, pp.73–78 (2008).
- 13) Schnadelbach, H., Penn, A., Steadman, P., Benford, S., Koleva, B. and Rodden, T.: Moving Office: Inhabiting a Dynamic Building, *CSCW 2006*, pp.313–322 (2006).
- 14) Uchiyama, S., Takemoto, K., Satoh, K., Yamamoto, H. and Tamura, H.: 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).

(平成 22 年 4 月 26 日受付)

(平成 22 年 10 月 4 日採録)



松山 岳史

2009年慶應義塾大学工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科博士前期課程在学中。複合現実感を用いた遠隔協調作業の研究に従事。



亀井 銀河

2010年慶應義塾大学工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科博士前期課程在学中。複合現実感を用いた遠隔協調作業の研究に従事。



坂内 祐一（正会員）

1980年早稲田大学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。2007年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了。博士（工学）。1980年キヤノン（株）入社。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、ICAT2007 Best Paper、2007年度情報処理学会論文賞を受賞。現在日本VR学会香りと生体情報研究委員会委員長、日本VR学会、ACM、IEEE-CS各会員。



岡田 謙一（フェロー）

慶應義塾大学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、情報処理学会理事、IE領域委員長、電子情報通信学会HB/KB幹事長。情報処理学会論文賞（1996、2001、2008）、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、ICAT'07最優秀論文賞等を受賞。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。