

複合現実空間における作業記録の可視化手法の提案と評価

宮 狭 和 大[†] 坂 内 祐 一^{††}
重 野 寛[†] 岡 田 謙 一[†]

複合現実感技術を用いて現実空間に仮想物体を重畳させることで、産業分野などにおける作業をシミュレーションすることができる。そのような作業の映像記録を参照することで作業の把握が可能であるが、作業映像を基にして作業の把握を試みる方法では、作業把握に有効な場面を知る指標が得られず、また3次元情報の把握が困難なため、効率の良い十分な作業把握を行うことが難しい。そこで本稿では、作業者が装着しているビデオシースルー HMD からの映像に加え、作業者による仮想物体の操作情報および作業者と仮想物体の位置・姿勢情報を記録し、それらを関連付けて可視化することにより、MR 空間で行われた作業の把握を支援することを提案する。そして提案概念を実現する作業把握支援システム MR Work Visualizer を構築し、その有用性を評価した。

A Recording and Visualization Method of Working Activities in a Mixed Reality Space

KAZUHIRO MIYASA,[†] YUICHI BANNAI,^{††} HIROSHI SHIGENO[†]
and KEN-ICHI OKADA[†]

Mixed Reality technology, which merges virtual objects into the real world, enables to simulate several works. Though it is possible to get the video from the video-see-through HMD that the user is wearing, it is not sufficient to analyze the work. We propose a new method to analyze the work in Mixed Reality space visualizing information about the worker and virtual objects connected with the video. We have implemented a work analysis support system called MR Quick Analyzer, and we evaluated the usability of the system.

1. はじめに

現実世界と CG や文字などの電子データによって表現される仮想世界をシームレスに融合させる技術である複合現実感 (Mixed Reality: MR) 技術は、現在、産業分野における作業支援^{1),2)} やエンタテインメント³⁾・医療技術⁴⁾ など様々な分野に応用が試みられている。特に産業分野においては、作業者に対して作業者の存在する空間に位置合わせされた CG により作業支援を行ったり、作業対象として実物体の代わりに CG による仮想物体を用いることで作業をシミュレーションしたりするといった応用があげられる。

我々はこれまで、上記のような MR 空間における作業シミュレーションの内容を記録し、後に作業記録

から内容把握を試みることに着目し、研究を行ってきた⁵⁾⁻⁷⁾。作業の記録として、一般的には作業者が作業を行う様子をとらえたビデオ映像が取得可能である。しかし、ビデオ映像を基にして作業を把握する方法では、映像全体から作業把握に有効な場面を知る指標が得られず効率の良い作業把握が困難であり、また、ビデオ映像は特定の視点から取得した2次元情報であるため、自分に合った視点から記録をレビューできず作業場の奥行きや作業対象物の3D構造を把握しにくく十分な作業把握が困難である。

そこで本研究では、MR 空間で行われた作業の記録を用いた作業把握を支援するため、MR 空間における動作情報として取得できる、作業者による仮想物体の操作情報および作業者と仮想物体の位置・姿勢情報を利用した作業把握支援を提案する。

これらの動作情報を作業を記録したビデオ映像と関連付けて可視化することにより、作業映像をレビューする際に、より効率の良い十分な作業の把握が可能となることが期待される。

[†] 慶應義塾大学理工学部情報工学科

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

^{††} キヤノン株式会社

Canon Inc.

本研究では、この提案を実現するシステム MR Work Visualizer を構築し、その有用性を評価した。以降 2 章では本提案の背景および従来手法の問題点を述べる。3 章では問題点を解決するための提案手法について、4 章ではその提案手法を実現するシステム MR Work Visualizer の実装について説明する。5 章では提案概念を評価するための実験および結果から得られた考察をまとめる。最後に 6 章で本研究のまとめと今後の展望について述べる。

2. 研究背景

本章では研究背景として、MR を利用した作業シミュレーションの位置付けを述べた後に、作業で得られた記録からその内容を把握する際に生じる問題点を関連研究を交えて説明する。

2.1 MR を利用した作業シミュレーション

現実空間で作業設計を行うことを考えた場合、作業環境実現にあたって時間やコストを要するもの、あるいは危険をとまなうものに関しては、その作業をシミュレーションすることができれば、実際に作業を行わなくても内容の把握・分析が可能となる。あるいは、作業環境のレイアウトの検討などにおいては、作業レイアウトを変えながらシミュレーションを重ね、分析する必要がある。

このような作業のシミュレーションを実現するために、現実空間に CG や文字などの電子データを重畳する技術である複合現実感技術の利用が有効であると考えられる。この技術を利用することで、HMD (Head Mounted Display) を装着した作業者は、MR 空間内で仮想物体を実物に見立ててインタラクションすることが可能である。このように、VR (Virtual Reality) とは異なり実空間で作業者自身の動作でシミュレーションできるのが MR の利点である。

一例として、部品を組み立てる組立作業において、コストや時間削減のために実物の組立部品を利用する代わりに仮想部品を用いて実物の作業台上で組立のシミュレーションを行うといったものが考えられる。本稿ではこの組立作業のような、作業者が机上で作業対象物に対して手で掴んで移動・回転・変形させるなどのインタラクションを一般的に行う作業のシミュレーションに着目する。

2.2 現状の作業把握とその問題点

前述のような MR 空間で行われた作業シミュレーションの内容を記録することで、後に作業内容をレビューして作業を把握するのに役立てることができる。特に、作業の学習者がそのプロセスを把握し実際に作

業を再現できるようになるために、プロフェッショナルが行った作業記録をレビューしながら作業を把握するという用途は、作業のプロフェッショナルを養成するという点などで有効であると考えられる。

本稿ではこのように、作業習得を目指す学習者に対して、プロフェッショナルによる作業記録を基にした作業把握を支援するシステムを提供することを目的に議論を進める。

2.2.1 作業把握の支援に必要な要件

作業の学習者による作業把握を支援するためには、以下の 2 つの要件を満たすべきであると考えられる。

- 要件 1

作業把握とは、作業者が作業対象物を目的の状態にするためにそれに対してどのような手順・動作でインタラクションを行ったかを、第三者がその内容をレビューすることで理解することを意味する。作業者がプロフェッショナルであったとしても、第三者である作業の学習者にとってすべての作業場面が作業を把握するために必要であるとは限らない。作業によっては、特に重要な場面をおさえさえすれば、十分に内容を把握できるものも存在する。したがって、学習者が作業をレビューする際に効率の良い作業把握を実現するためには、作業プロセスのポイントが集約された場面を表す情報を取得できる必要がある。

- 要件 2

作業者が行った作業記録は、必ずしも学習者が参照して確実に理解できる状態で記録されているとは限らない。学習者が作業のレビューを行う際に十分に作業内容を把握するためには、学習者は作業者が行う作業の情報を明確に自分に伝わる形で取得できる必要がある。

2.2.2 ビデオ映像を基にした作業把握の課題

通常、作業記録から作業を把握することを考えた場合、作業のビデオ映像を用いることが一般的であり、記録されたビデオ映像を解析し、様々な形で再生することで作業習得・改善に役立てている⁸⁾。上記の要件をふまえたうえで、ビデオ映像を基にした現状の作業把握手段の課題を論じる。

要件 1 に関する課題

- ビデオ映像はシーケンシャルなパターン情報なので、作業把握に重要となる場面を見つけるためのインデックスを持たないため、ビデオ映像を検索しながら作業を効率的に把握するのが困難である。

要件 2 に関する課題

- (1) 作業のビデオ映像は作業時に特定の視点から取

得した情報であるため、その映像が必ずしもレビューする人にとって把握しやすいものであるとは限らない。

- (2) 作業のビデオ映像は2次元情報であるため、作業場の奥行き情報や作業対象物の3D構造を把握することが困難である。特に立体的な構造を持つ対象物を扱ったり、作業者の立体的な動きが重要な意味を持つ作業に関しては、作業工程を3Dで把握することは必須であるため、2次元のビデオ映像では作業習得が難しいと考えられる。

2.2.3 従来研究の問題点

従来研究において、2.2.1項の要件1・2に関連していくつかのアプローチが行われている。これらのアプローチに関して、その内容に加え2.2.2項の要件に関する課題について解決できていない点を以下に述べる。

● 要件1へのアプローチ

作業記録から作業把握に重要となる情報を抽出する方法として、映像データベースやアーカイブから効率的な検索を行うためにインデクシングを行う技術が考えられる。谷口ら⁹⁾が開発した“Scene Cabinet”のように映像解析技術を用いて自動的にインデクシングする技術は多数行われているが、その精度は100%ではなく確実に思いどおりのシーンをインデクシング可能でないため、間違ったシーンにアクセスすることで作業把握の効率が下がってしまう可能性がある。

また映像以外にもカメラ操作情報や音声情報などを組み合わせてインデクシングを行うシステムも多数提案されているが、これらインデクシング作業に要するコストは現状ではまだ大きく、現実的ではない。

したがって、ビデオ映像を検索しながら効率的に作業を把握するのが困難であるという現状の課題は解決されない。

● 要件2へのアプローチ

作業記録から作業情報が明確にレビューする第三者に伝わるようにするために、作業者視点からの映像を取得することが考えられる。作業者視点からのビデオ映像は、映像を見ている人間が実際に作業者と同じ立場で作業の様子を確認できるという点で直感的に分かりやすく、作業の状況を把握するうえで有益な情報であるといえる。

Fusselら¹⁰⁾の研究において、HMDにカメラをつけた作業者の映像を基に、遠隔の指示者が作業指示を行って作業者を指示するシステムを開発し

ている。ここでFusselらは対面環境との比較評価を行っているが、対面型の作業に比べて劣点として作業者映像の視野が限られており、対象物がカメラの視野外になることがコミュニケーションの阻害要因になったことを報告している。このことは作業者の状況を把握するうえでもマイナス要因になると考えられる。

したがって、作業者視点からのビデオ映像を取得するだけでは、その情報は必ずしも第三者にとって把握しやすいものであるとはいえず、また3D情報の把握も困難であるため、現状の課題が解決されているとはいえない。

3. 提案手法

本章では、上述の問題点を解決するための提案手法について、その提案概念の概要を述べた後、概念の詳細を述べる。

3.1 MR作業空間における作業記録の可視化手法の提案

MRを利用して実現される作業シミュレーションを行う空間を作業者空間と呼ぶものとする。この空間での作業シミュレーションでは、2.2.3項でメリットを説明した作業者視点からの映像を、作業者の装着するビデオシースルーHMDから取得できる。それに加え、実空間の存在である作業者自身が仮想の作業対象物とインタラクションする情報、あるいはそれぞれの位置・姿勢情報をリアルタイムに取得可能である。これらの特性を利用して作業把握を支援する手法を述べる。

1つ目に、作業者空間において作業者が仮想物体を操作する情報を記録し、作業シーン検索のためのインデックスとして用いることを考える。作業を把握するうえで重要となるシーンを判断する材料として、机上作業シーンの自動撮影のためのカメラワークで、料理番組や工作番組でのショットを解析した結果、机上の作業対象物や手の動きのショットの合計が70%~80%、解説者(作業者)を含む全体の映像が10%~20%であることが報告されている¹¹⁾。このことから机上作業の内容を把握するために、作業対象物やそれを扱う作業者の手の動きをとらえたシーンは重要であると考えられる。作業者が作業対象物である仮想物体を操作するシーンには、作業対象物や作業者の手の動きがとらえられていると考えて問題はないため、そのシーンをインデクシングすることで効率的な作業把握に役立つと予想され、2.2.2項の要件1に関する課題が解決できると考える。

2つ目に、作業者空間上の作業者と仮想物体の位置・

姿勢情報を記録し、それを基にして作業空間を 3D でモデル化した第三者視点を表示することを考える。作業空間を 3D でモデル化することにより、作業をレビューする人は自分が最も作業を理解しやすい視点から確認することができるため、2.2.2 項の要件 2 に関する課題 (1) が解決される。さらに 3D のモデルを視点を変えて観察できることから、作業場の 3D 情報を確実に把握できると考えられるため、要件 2 に関する課題 (2) が解決可能であると考えられる。

本稿では、これらの仮想物体の操作情報および作業者と仮想物体の位置・姿勢情報をまとめて、作業空間で得られる動作情報と定義する。この MR 空間において記録された動作情報を作業者の HMD 映像と関連付けて可視化することで、学習者による作業把握を支援する手法を提案する。

3.2 仮想物体の操作情報の可視化

仮想物体の操作情報とは、作業者がどの仮想物体をいつからいつまでの間把持していたかという情報を表す。本稿で対象としているような、作業者が作業対象物に対して手で掴んで移動・回転・変形させるなどのインタラクションを行う机上作業においては、操作情報にその作業における重要なポイントが集約されているため、この情報を可視化することにより瞬時/直感的に作業を把握できるという効果がある。

仮想物体の操作情報をビデオ映像のインデックス情報として表示することで、操作情報を作業者 HMD 映像と関連付けて可視化する。作業空間において作業者はデバイスを介して仮想物体とインタラクションを行うため、インタラクションした情報をデバイスを通じて検出できれば、仮想物体の操作情報は 100% インデクシング可能であり、インデクシング作業自体にコストも要さないため、2.2.3 項の既存のインデクシング技術の問題点は生じない。

図 1 に示すように作業映像の時間軸に沿って操作情報を付加したラベルをマッピングし、これを仮想物体操作インデックスと呼ぶ。作業映像をレビューする際に、このインデックス上の特定の仮想物が操作された時間帯を表す部分にアクセスすることで、それを表すシーンを確認することができる。これにより、純粋に作業者が作業対象物を操作しているシーンのみをピックアップして見ることで作業の効率的な把握が可能になると考えられる。

また、このような情報の可視化方法は、他の文字や数値などによる情報の表示方法に比べて省スペースであり、また直感的に情報を把握できるので、作業映像へのアクセシビリティが高いという特徴を持つ。

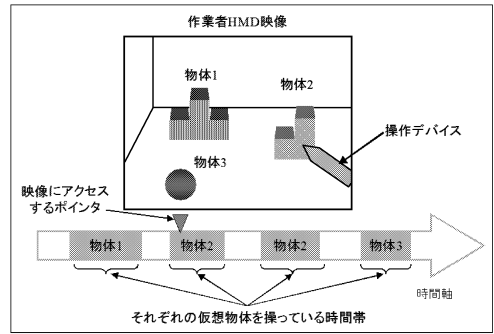


図 1 仮想物体操作インデックス
Fig. 1 Object manipulation index.

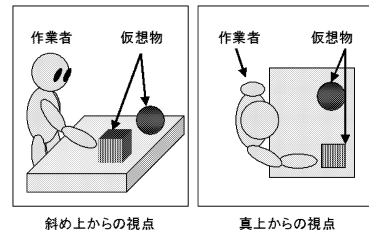


図 2 3DCG による第三者視点
Fig. 2 Examples of 3D graphical view.

3.3 3次元位置・姿勢情報による第三者視点表示
蓄積した作業者と作業対象仮想物の位置・姿勢情報を利用して、モデル化されたそれらの情報を 3D の CG として仮想空間上に表示することで、作業のレビュー時に作業者を含む作業場を自由な視点でかつ立体的に観察できる第三者視点を実現する。

作業のレビューを行う際には、作業把握のために必要最低限の情報を CG としてモデル化することにより、実世界の情報を含まない仮想空間であっても十分に作業のレビューに有用であると考えられる。むしろ、背景などに作業把握には必要のない余分な情報を含む可能性のある実空間を映した記録からよりも作業のプロセスをより明確に把握できるというメリットも存在する。

図 2 は、実世界の作業者と作業デスク、そして作業対象の仮想物が 3D の CG として表現された仮想の第三者視点を表す。蓄積した作業者の視点映像に連動して作業の推移を仮想空間上の CG の動作で表現することで、映像では把握しきれない情報を第三者視点から確認できることが期待される。作業者の視点映像から外れている情報も、第三者視点を変更することで観察できるため、2.2.3 項の作業者視点からのビデオ映像のみを用いた作業把握の問題点は生じない。

4. MR Work Visualizer の実装

本章では、提案概念を実現するシステム MR Work Visualizer の実装に関して、作業者が作業シミュレーションを行う作業場の実装、その際に取得できる記録の関連付けの方法、そしてそれらを可視化するインタフェースの順に説明する。

4.1 作業者空間の構築

本実装では、キヤノン社が開発した MR Platform システム¹²⁾ を基盤にして、作業シミュレーションの場の構築を行った。図 3 は作業場のシステムの概要を表している。

MR Platform システムでは、MR 空間を表示するデバイスとしてビデオスルー HMD を用いる。この HMD と MR 空間内での操作インタフェースを実現するスタイラスには磁気センサのレーザーが搭載されており、6 自由度の位置・姿勢が取得できる。MR Platform システムの機能により、磁気センサの出力値に基づいて HMD の視野内に検出されるマーカによる HMD の位置・姿勢の補正が行われ、この値を基に現実世界への CG の位置合わせ処理が行われる。

スタイラスはワンボタン式のインタフェースになっており、本システムではこのデバイスを用いた仮想空間の操作機能を提供する MR Platform Plus を利用して仮想物体の操作環境を実現している。本システムではスタイラス中心から特定の範囲内（半径 5 cm）に入った仮想物体の位置・姿勢をスタイラスの位置・姿勢の変化量と同じだけ変化させることで、仮想物体のGrab機能を実装している。ここでは図 3 のように仮想物体をGrab可能な範囲を半透明の球状で可視化することで仮想物体をGrabできる範囲が明確化されており、直感的で分かりやすい操作インタフェースが実現されている。

4.2 作業情報の記録と関連付け

本システムでは、作業時の作業者の視点映像と 3 章

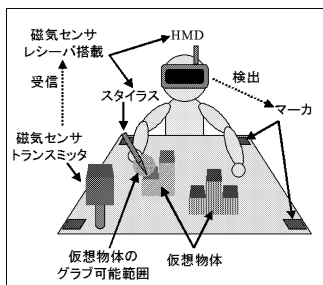


図 3 本稿における作業場モデル

Fig. 3 The model of the work space.

で述べた作業における動作情報の関連付けを行うために、作業を記録する際に作業者の視点映像をキャプチャすると同時に、その瞬間の作業者による仮想物体の操作情報、および作業者とすべての仮想物体に関する 3 次元位置・姿勢情報を取得する仕組みを用いている。

作業者の HMD 映像としては、HMD のカメラから PC のビデオキャプチャカードに入力された実世界の映像上に CG の仮想世界が重畳された後の、グラフィックボードからの映像を記録している。

画像キャプチャの瞬間に取得する仮想物体の操作情報に関しては、画像のキャプチャの瞬間に作業者が仮想物体を把持しているかどうかの判定を行い、把持している場合はさらに仮想物体を特定する ID 情報も記録する。これによりすべての画像フレームにおいて、その瞬間にどの仮想物体が操作されているかという情報を含めた仮想物体の操作情報が関連付けられる。

画像キャプチャの瞬間に取得する 3 次元位置・姿勢情報として、仮想物体に関しては元々電子データであるのですべて記録可能であるが、作業者は実空間の存在であるため、全身の位置・姿勢情報をリアルタイムで記録することは、多くのセンサを身につける必要があるなどの制約があるため困難であり、記録できる部位は限られてくる。本実装においては作業者の装着する HMD とスタイラスの位置・姿勢情報を記録する仕様とした。

記録部位としてこの 2 つを選んだのは、HMD は作業者の頭（目）の位置・姿勢を表すため、作業者がどの位置からどの方向を向いているかという情報が取得でき、スタイラスは作業者の手の位置・姿勢を表すため、作業者が何をどのように操作しているかという情報が取得でき、作業の様子を把握するために必要な情報であると考えたためである。また、本稿で対象とする作業は作業者が机上で手のみを用いて対象物とインタラクションを行うものに限るので、HMD とスタイラスの位置・姿勢情報だけで作業自体の把握は十分に可能であると考えられる。

仮想物体の操作情報と同様、すべての画像フレームにおいて、作業者およびすべての仮想物体の位置・姿勢情報が関連付けられる。

4.3 作業分析インタフェース

本システムは、図 4 のように、再生の時間軸上に仮想物体操作インデックスがマッピングされたインデックス表示動画プレイヤーと作業時の 3 次元情報を 3D 仮想シーンとして表現する 3D グラフィカルビューワの 2 つのインタフェースに分けられる。

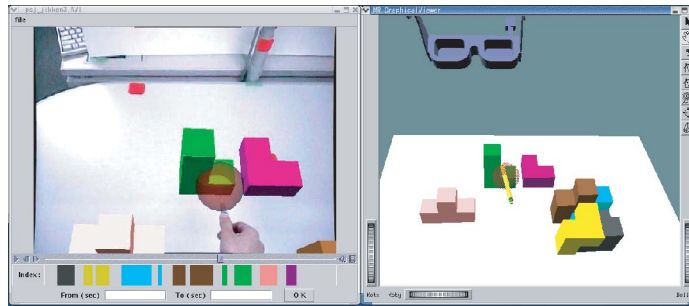


図 4 作業分析インタフェース

Fig. 4 The interface of MR work visualizer.

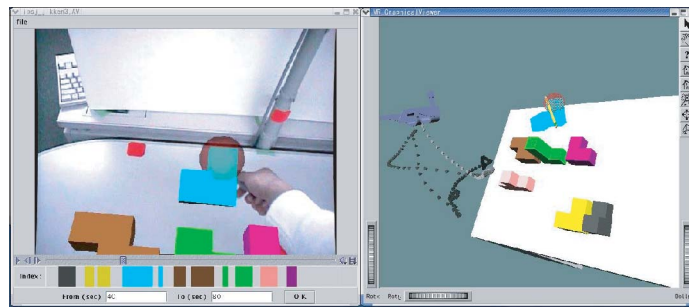


図 5 HMD の軌跡表示

Fig. 5 The sequence of the HMD motion.

4.3.1 インデックス表示動画プレイヤー

図 4 の左側のウィンドウがインデックス表示動画プレイヤーを表す。インデックス表示動画プレイヤーは上部の作業者の視点映像を再生する動画再生パネルと下部の仮想物体操作インデックスからなる。仮想物体操作インデックスでは、仮想物体を特定する情報として仮想物体の色情報を用いる。色情報を利用することで直感的に仮想物体を見分けることができると考えたためである。ただし、仮想物体が色で判別できない場合は使用できない。動画を再生することで、動画再生パネルの下にあるスライドが左から右に移動する。作業をレビューする人間はスライドをこのインデックスに沿って移動させることで、仮想物体が操作されているシーンに素早くアクセスすることができる。

4.3.2 3D グラフィカルビューワ

図 4 の右側のウィンドウが 3D グラフィカルビューワを表す。3D グラフィカルビューワは 3D モデル再生部とその周辺の操作部からなる。3D モデル再生部には動画プレイヤーのシーンに一致する作業者（HMD とスタイラス）と仮想物体の CG が表示されており、周辺の操作部にあるホイールを回転させることで、視野の移動・回転や拡大・縮小が可能となり、自分の好きな視点でシーンを見ることができる。図 4 は、これらのモデル化された HMD やスタイラスや仮想物体が

3D の CG で表現されるシーンが、作業の流れに沿って動画プレイヤーと同期して再生されている様子を表している。

さらに図 5 に示すように、左側の動画プレイヤーの下の部分に開始時刻と終了時刻を打ち込むことで、右側のビューワ上にその分の時間帯に一致する過去の HMD の軌跡を表すドットの集合を表示させることができる。これにより作業者の動きの推移を分析することが可能となる。加えて HMD の軌跡上の特定のドットを指定することで、それに対応する作業の映像を動画プレイヤー上に表示することができる。このように、動画プレイヤーとビューワのどちらからでも所望の時刻のシーンにアクセスできる機能を実現しており、作業の分析に役立てることが可能となっている。

5. 評価実験

本章では、実装システムの評価を行ううえで、仮想物体操作インデックスの有効性を検証した後に 3D グラフィカルビューワの有効性およびシステム全体の有用性を評価した。

5.1 実験 1：仮想物体操作インデックスの評価

本実験では、仮想物体操作インデックスを用いることで作業プロセスのポイントが集約された場面を的確に知ることができ、その結果効率的な作業把握が可能

になったかについて評価した。

5.1.1 実験内容

実験の準備段階として、あらかじめ MR 空間上で作業シミュレーションを行った。ここでは、一般に考えられる部品の組立作業を模した一例として、模型を組み立てる作業のシミュレーションを行った。作業者は 2 種類の模型の組立作業を、仮想物体として表現された部品を用いて MR 空間上で行った。

組立作業の詳細は、デスク上に等間隔に配置された仮想部品（合計 15 個）から順番に部品を選び、それを 1 カ所に組み立てていくという内容である。このとき、最初の組立部品以外の部品に関しては、すでに組み立てられた仮想部品のどれか 1 つ以上に必ず接続されるようにした。

作業者は上記の内容の作業を 2 種類行い、一部始終の作業映像を両作業ともに、作業 HMD から見える視点映像の動画として取得した。動画の合計時間は両方とも約 2 分間であり、組立作業の内容以外はすべて同じ条件とした。

被験者へ課したタスク

被験者には各作業映像について、制限時間 4 分間でその動画を見ながら問題に解答するというタスクを課した。出題した問題の内容は、各作業映像について仮想部品が組み立てられた順に、その初期位置および接続先の仮想物の色・形状を回答する、というものにした。その具体的な説明を以下に述べる。

- 初期位置について

被験者は、仮想部品の初期位置のモデルが載せられた表から、映像の中で操作されている仮想部品が最初に置かれていた位置を選び、該当する記号を回答する。

- 接続先の仮想物について

作業者が操作中の仮想部品をある仮想部品に接続した場合、被験者は接続された側の仮想物の色・形状を回答する。たとえば、図 6 のように、次に操作する仮想物が初期位置 D の青い直方体であり、それを組み立て中の物体の上部の黒色の立方体に接続した場合、回答するのは「黒」と「立方体」である。

被験者にこのようなタスクを課すことにより、動画の中の作業者が仮想部品をどこからつかんで、組立途中の物体のどの部分へ接続したかについて、被験者が制限時間内にどの程度把握できたかを確認することができる。つまり、このタスクにより被験者がいかに素早く正確に作業内容を把握できたかを定量的に判断することができる。

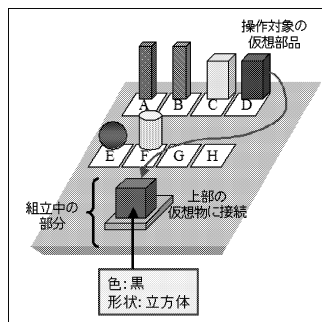


図 6 組立作業のイメージ

Fig.6 The illustration of the assembly work.

表 1 実験 1 におけるタスクの組合せ

Table 1 The combinations of tasks in experiment 1.

	動画 1	動画 2
グループ A	インデックスあり	インデックスなし
グループ B	インデックスなし	インデックスあり

比較

表 1 に示すように、24 人の被験者をグループ A (12 人) とグループ B (12 人) の 2 グループに分け、どちらのグループも 2 種類の作業動画のうち、一方の動画については実装した仮想物体操作インデックス（以下インデックス）を用いて問題を解いてもらい、もう一方の動画についてはインデックスを使わずに動画のみを見ながら解いてもらった。このような比較を行うことで、インデックスを用いた場合の方が良い結果となることを期待し、仮想物体操作インデックスが作業把握を支援することの確認を試みた。

5.1.2 実験結果と考察

表 2 は、被験者に課した問題の正答率と問題の解答欄に空欄が占める比率の平均値を、仮想物体操作インデックス（以下インデックス）を用いない場合と用いた場合についてそれぞれまとめたものである。まず、表 2 の解答欄の空欄率を見ると、インデックスを利用せずに問題を解いた場合の解答欄中に空欄が占める割合は、利用した場合の 1.8 倍にものぼる。この解答欄中の空欄は、被験者が制限時間中に問題を解き終えている部分にはなく、すべて時間中には間に合わず解答できなかった部分であることが、実験中の被験者の観察および結果から判明している。したがって、この結果からインデックスを用いた場合の方が、利用しない場合よりも時間中に多くの問題を解くことができたことが分かる。いいかえると、インデックスを用いた方が素早く作業映像を確認することができたことを意味する。

次に、表 2 の正答率の欄を見ると、インデックスを

表 2 実験 1 の結果

Table 2 The result of experiment 1.

	インデックスなし	インデックスあり
正答率	0.66	0.80
解答欄の空欄率	0.25	0.14

(値はすべて平均値, $N = 24$ 値)

利用した方が、利用しない場合よりも高い正答率を出していることが分かる。この差が有意なものであることを確認するために、インデックスを利用した場合の各被験者の正答率の集合と、利用しない場合のそれとの間で t 検定を行ったところ、棄却率 p は以下のようになった。

$$p = 0.0074 \quad (N = 24, \quad p < 0.01)$$

このことから、この 2 群の間には有意水準 1% で有意に差があることが分かる。したがって、インデックスを利用した方が作業映像の内容をより多く確実に把握できたといえる。

このことと、先ほどの解答欄中の空欄率から得られた考察の内容を総合すると、仮想物体操作インデックスを用いることでより短時間で正確に効率良く作業を把握することが可能となったことが分かる。したがって、仮想物体操作インデックスは、効率の良い作業把握を実現するための信頼に足る指標であるといえる。

5.2 実験 2 : 3D グラフィカルビューワの評価

ここでは 3D グラフィカルビューワを用いることで、作業シーンの 3D 情報を確実に把握でき、その結果十分な作業把握が可能となったかの評価を行った後、仮想物体操作インデックスとの併用を行う本システムの全体としての有用性を検討する。

5.2.1 実験内容

あらかじめ実験の準備段階として、作業者が作業対象物の 3D 構造を把握しながら作業を進める必要のある 3D パズルの組立作業を、仮想物体として表現された 3D パズルを用いて MR 空間上で行った。

このときの 3D パズルの組立作業は、作業者が机上に置かれた 7 つのパーツを順に 1 つずつ取って組立位置に組み上げる内容となる。

実験 1 同様、作業者は上記の内容の作業を 2 種類行い、一部始終の映像を両作業ともに、作業者 HMD から見える視点映像の動画として取得した。動画の合計時間は両方とも約 2 分間であり、パズルの組立作業の内容以外はすべて同じ条件とした。

被験者へ課したタスク

合計 16 人の被験者には各作業映像についてその動画を見ながら、組立作業で用いられた仮想物体のパス

表 3 実験 2 におけるタスクの組合せ

Table 3 The combinations of tasks in experiment 2.

	動画 1	動画 2
グループ A	インデックス ・ 3D ビューワ併用	インデックスのみ
グループ B	インデックスのみ	インデックス ・ 3D ビューワ併用

ルと同じ形状でミニチュアサイズの実物のパズルを、実際に動画とまったく同じ手順で組み上げてもらった。比較

表 3 に示すように、16 人の被験者をグループ A (8 人) とグループ B (8 人) の 2 グループに分け、どちらのグループも 2 種類の作業動画のうち、一方の動画については仮想物体操作インデックスを含むインデックス表示動画プレイヤー (以下インデックス) と 3D グラフィカルビューワ (以下 3D ビューワ) の両方を併用しながらタスクにあたってもらい、もう一方の動画については 3D ビューワを用いずにインデックスのみを用いてタスクにあたってもらった。このような比較を行うことで、インデックスを利用したうえで 3D ビューワを活用する方がインデックス単体よりも十分な作業把握が可能となる結果を期待し、3D ビューワが作業把握を支援することの確認を試みた。

5.2.2 実験結果と考察

実験で得られた結果を基に、3D ビューワの有効性、システム全体の有用性の順で考察する。

3D グラフィカルビューワの有効性

図 7 は被験者がタスク完了までに要した時間の平均値を、3D ビューワを用いない場合 (インデックスのみを用いた場合) と、3D ビューワを用いた場合 (インデックスと 3D ビューワを併用した場合) で表したものである。図 7 では、被験者がタスク中に行った動作ごとにそれに要した時間の内訳が秒単位で表示されている。左側の 3D ビューワを用いない場合の内訳はインデックスを利用した時間、実物のパズルの組立に費やした時間、その他の 3 つに分けられる。右側の 3D ビューワを用いた場合の内訳は前の 3 つに 3D ビューワを利用した時間を加えた構成となる。

図 7 から、タスク完了に要した時間は 3D ビューワを用いない場合も用いた場合もほとんど変わらない結果になったことが分かる。このように 3D ビューワを用いた場合の時間的な優位性が得られなかった原因としては、1 つに 3D ビューワを利用すれば確実に作業状況を把握できるが被験者が視点変更を行う際に用いるスクロールバーのインタフェースがやや扱いにくかったことがあげられる。実験中、スクロールバーが細

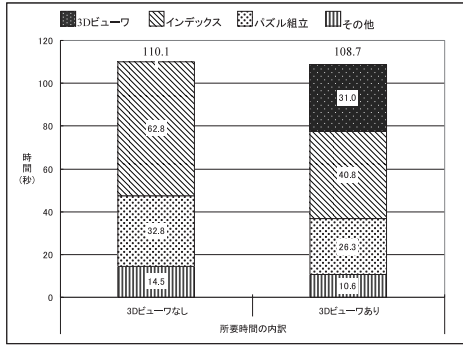


図 7 タスク所要時間の内訳

Fig. 7 The breakdown of the task duration.

表 4 カーソルを操っているがインタフェースに入力を行っていない時間

Table 4 The time participants were manipulating the mouse cursor but not inputting anything into the interface.

	インデックスのみ	インデックス・3Dビュー併用
時間 (秒)	1.3	10.6
所要時間全体に占める割合 (%)	1.2	9.7

長い形状をとっているために被験者がスクロールバーにカーソルを合わせるのに手間どったり、スクロールバーによる視点変更が画面横方向の回転・縦方向の回転・奥行き方向のズームの3種類に分けられ、それぞれに別々のスクロールバーが割り当てられているため、視点を調整する際に複数のスクロールバーの間をカーソルが行き来することで被験者が時間を要する場面が見受けられた。

また、インデックスのみを用いてタスクを行う場合は、カーソルはつねに動画プレイヤーの再生ポインタの位置に合わせておけばよいが、両方のアプリケーションを用いた場合、アプリケーションの間でカーソルを移動させる時間を合計すると、時間的には無視できないロスになると考えられる。

以上のような、被験者がインタフェースを使用している最中において、カーソルを操ってはいるが実際にはどちらのインタフェースにも入力を行っていない時間を、インデックスのみを用いた場合とインデックスと3Dビューを併用した場合とで集計したところ、表4のようになった。

結果から、インデックスのみの場合は所要時間全体に占める割合が1.2%と考慮に入れる必要がないほど小さい値をとっているといえるが、両インタフェースを併用した場合は9.7%と無視できない値となってい

る。したがって、実際の作業把握に本質的には関係のないこのような時間のロスを省いてタスク所要時間を図7と表4から計算した場合、両インタフェースを併用した場合には98.1秒となり1割近く短縮され、インデックスのみの場合(108.8秒)よりも10.7秒短いことになり、時間的優位性が表れるといえる。

インタフェースの改善によって上記の時間ロスの短縮を図ることで、両インタフェースを併用した場合の作業把握にかかる時間を大幅に効率化できることが期待される。

次に図7の個々の内訳に着目すると、3Dビューを用いた方は用いないときよりもインデックスの利用時間が22秒、パズルの組立時間も6.5秒短くなっている。この結果から被験者はインデックスと3Dビューを併用することで、インデックスの利用効率が高ると同時に、パズルの組立効率も上昇していることが分かる。

また、図8は各作業動画について、全7工程からなる3Dパズルの組立作業における1工程(作業者が1つのパズル部品を手にとってから所定の場所にはめ込むまでの動作)ごとに、被験者が動画を見ながら実物のパズルを組み立てる際に間違えた回数の平均を表している。図8から、全体的に間違い回数は少なかったことが分かるが、3Dビューを用いない場合は動画1の工程2・5や動画2の工程2において特に間違い回数が多く、全体の平均も0.13回という値をとっているのに対し、3Dビューを用いた場合は唯一動画1の工程5において間違いが生じているが、それ以外はまったく間違いが生じず、全体の平均も0.009回と0に近い値をとっていることが分かる。

本実験において特に動画1の工程2・5や動画2の工程2は、作業者がパズル部品を組立場所にはめ込む際にパズルの一面が作業者から見て真正面に写っているため、奥行き情報がほとんど得られず、被験者にとっては2Dの情報である動画からではパズルの向きが分かりにくくなっている。そのため、被験者が確実にパズルの向きが把握できないまま組立場所にはめ込んでしまい、組立に間違いが生じてしまったと考えられる。3Dビューを用いた場合はほとんど間違いが生じなかったことから、3Dビューを活用することで間違いを起こすことなく確実にパズルの奥行きや3D情報を把握できたことが分かる。さらに、3Dビューを用いない場合において、これらの工程においてパズルを所定の位置にはめ込むまでに被験者がしばらくパズルをくるくると回しながら向きを変えているシーンが観察された。このことから被験者がパズルの3D情報

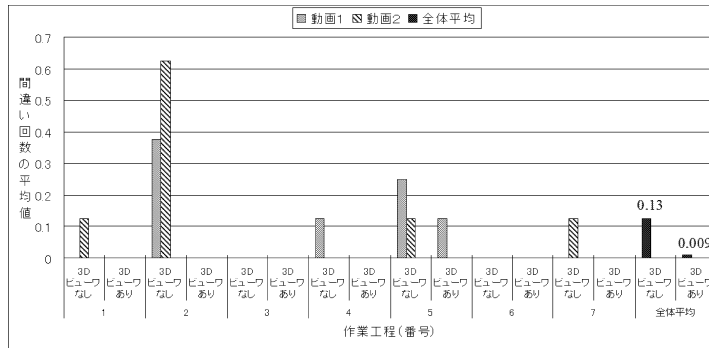


図 8 工程ごとのパズル組立の間違い回数

Fig. 8 The number of mistakes of puzzle assembly work per process.

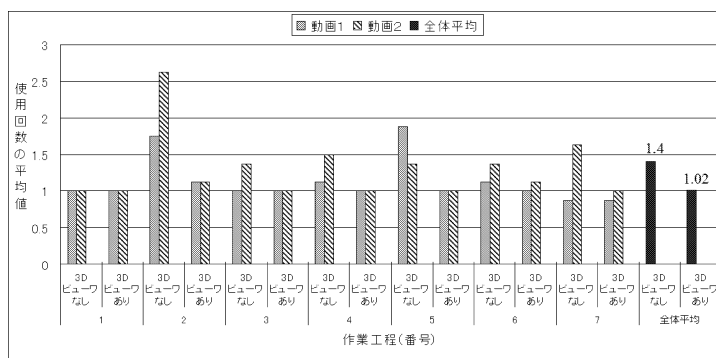


図 9 工程ごとの仮想物体操作インデックスを用いた組立シーンの確認回数

Fig. 9 The number of checking the assembly scene by using object manipulation index per process.

をすぐには把握できなかったことが推察され、前述の組立の間違いやこのような 3D 情報の把握の遅れが、図 7 の結果において組立時間が 3D ビューワを用いた場合に比べて大きくなってしまった原因であると考えられる。

以上のことから、被験者は 3D ビューワを用いることで確実に作業シーンの 3D 情報を把握することができ、それによってより素早くかつ正確に作業をレビューしながら作業者の行った作業を再現できたことができる。したがって 3D ビューワを活用することで、十分な作業把握が可能になったといえる。

システム全体の有用性

次にインデックスのみを用いた場合（3D ビューワを用いない場合）とインデックスと 3D ビューワを併用した場合（3D ビューワを用いた場合）ではタスクの遂行方法にどのような違いが出たかについて考察し、両方のインタフェースを併用した場合の特徴を明らかにすることで、システム全体としての有用性を探る。

図 9 はそれぞれの作業動画別に、パズルの組立作業

における 1 工程ごとに被験者がその工程を表すシーンをインデックスを用いて確認した回数の平均を表している。図 9 の 3D ビューワを用いない場合の結果は、図 8 の結果同様、タスク 1 の工程 2・5 やタスク 2 の工程 2 の値が特に大きくなっている。

このことから、これらの工程において 1 工程の内容を把握するためにはインデックスを用いて何回か繰り返しシーンを確認し直す必要が生じたことが分かる。これは前述のように、これらの工程を映した映像からパズルの奥行き情報がほとんど得られないため、作業者がどのような方向からパズルをはめ込むかを細かく観察していないと、内容が把握できなかったためであると考えられる。

これに対し 3D ビューワを用いた場合は、ほぼどの工程においても回数が 1 に近い値をとっており、全体の平均値も 1.01 回という結果になっていることから、1 工程のシーンを把握するためにインデックスを用いて繰り返しそのシーンを確認することはほとんどなかったことが分かる。

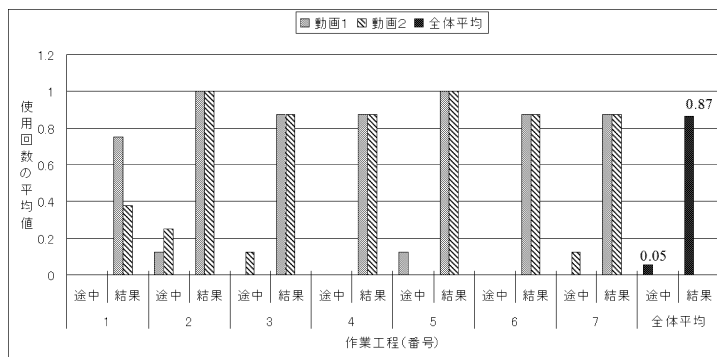


図 10 工程ごとの 3D グラフィカルビューの使用頻度

Fig.10 The frequency in use of 3D Graphical Viewer per process.

この結果から、インデックスの使い方に関して、3D ビューワを用いた場合の方が効率面で理想に近い使い方をしているといえる。図 7 において、3D ビューワを用いた場合のインデックスの利用時間が利用しない場合よりも大幅に短縮されているのはこのためであると考えられる。

また図 10 は 3D ビューワを用いた場合に関して作業動画別に、組立の 1 工程をさらに工程途中（作業者が 1 つのパズル部品を手にとってから所定の場所にはめ込むまでのシーン）と工程結果（作業者が 1 つのパズル部品を所定の場所にはめ込んだのが分かるシーン）の 2 つの状態に分け、それぞれのシーンごとに被験者が 3D ビューワを利用した回数の平均を表したものである。全体の平均として、工程途中が 0.05 回という 0 に近い値をとり、工程結果が 0.87 回という 1 に近い値をとっていることから、被験者は工程途中のシーンではほとんど 3D ビューワを使わず、工程結果のシーンで 1 回活用することが大半であったことが分かる。このとき、3D ビューワにおける「1 回」の操作は、1 つのシーンにおいて被験者が 3D ビューワ上で視点変更を開始してから所望の視点に固定するまで連続して視点変更を行う動作を表す。この結果は、3D ビューワを利用することで作業シーンを自分の見たい視点から確認できるため、被験者は工程途中を確認しなくても 1 つの工程結果のシーンを様々な角度から眺めるだけで状態を把握できたことを表していると考えられる。

以上、図 9, 10 の 3D ビューワに関する結果から、被験者は各工程ごとに、同じシーンに繰り返しアクセスすることなくインデックスを用いて効率良く工程結果のシーンに 1 度だけアクセスした後、3D ビューワを使用して自分の見たい視点で確実にシーンの状態を把握するという、両者の利点を活かした効率的な作業

把握の手段を用いていたことが分かる。このことから、インデックスと 3D ビューワを併用する本システム全体としても有用であったといえる。

6. まとめと今後の展望

本稿では、MR 空間で行われた作業シミュレーションの記録からの効率の良い十分な作業把握を実現する枠組みとして、作業者による仮想物体の操作情報、および作業者と仮想物の 3 次元位置・姿勢情報を作業映像と関連付けて可視化し、それらを基にした作業映像のレビューを可能にする手法を提案した。

この提案概念を実現するためのシステムの一例として、MR Work Visualizer を構築し、評価実験により本システムが、作業習得を目指す学習者がプロフェッショナルによる作業記録を基にした作業把握を行うのを、支援することを確認した。

今後の展望として、仮想物体操作インデックス上でそれぞれの仮想物体を特定する情報として、今回の実装では仮想物の色情報を可視化したが、色によって判別できない仮想物が多数ある場合には、それ以外の手段で仮想物を判別する必要がある。一例として、仮想物体の形状や ID 情報、仮想物体が写ったシーンのサムネイル画像などによる表示が考えられる。したがって、本システムをより多くの作業環境に柔軟に対応できるようにするには、そのような情報を付加する必要があると考えられる。

また、実験 2 の考察で述べたとおり、インデックスと 3D ビューワを併用するインタフェースをより扱いやすくすることで、3D ビューワを用いた際の時間的な効率の上昇も望むことができる。さらに、今回実装した 3D ビューワ上での HMD の軌跡表示による作業の分析機能に関しても、作業の学習目的に限らず作業者自身の作業改善の目的で利用するなど、今後具体的

な適用例を検討することで、システムの新たな有用性を見出すことができると考える。

参考文献

- 1) Webster, A., Feiner, S., MacIntyre, B., Massie, W. and Krueger, T.: Augmented Reality in Architectural Construction, Inspection, and Renovation, *Proc. ASCE Computing in C.E.*, pp.913-919 (1996).
- 2) 坂内祐一, 山本裕之: 複合現実感による作業支援, GN-49-4, pp19-24 (2003).
- 3) 大島登志一, 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行: RV-Border Guards: 複数人参加型複合現実感ゲーム, *TVRSJ*, Vol.4, No.4, pp.699-706 (1999).
- 4) 廖 洪恩, 中島 勸, 岩原 誠, 小林英津子, 佐久間一郎, 矢作直樹, 土肥健純: Integral Videography を用いた手術支援リアルタイム三次元ナビゲーションシステムの開発, 日本コンピュータ外科学会誌 (*J. JSCAS*), Vol.2, No.4, pp.245-252 (2000).
- 5) 宮狭和太, 坂内祐一, 宮田章裕, 本田研作, 重野 寛, 岡田謙一: 複合現実空間における仮想物に関する情報を用いた作業分析支援, 情報処理学会第 51 回 GN 研究会, pp.121-126, (Mar. 2004).
- 6) 宮狭和太, 坂内祐一, 宮田章裕, 本田研作, 重野 寛, 岡田謙一: 複合現実空間における作業の記録・再生手法の提案, パーチャルリアリティ学会第 20 回 CS 研究会, pp.19-24 (May 2004).
- 7) Miyasa, K., Bannai, Y., Miyata, A., Shigeno, H. and Okada, K.: A Visualization Method of Working Activities in a Mixed Reality Space for Supporting Work Analysis, *The 14th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2004)*, pp.325-330, (Dec. 2004).
- 8) 勝呂隆男: 経営工学における IT ツール, 技術士: 日本技術士会創立 50 周年記念特集号, pp.84-87 (2001).
- 9) 谷口行信, 南 憲一, 佐藤 隆, 桑野秀豪, 児島治彦, 外村佳伸: Scene Cabinet: 映像解析技術を統合した映像インデクシングシステム, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-2, No.6, pp.1112-1121 (2001).
- 10) Fussel, R., Kraut, R.E. and Siegel, J.: Coordination of Communication: Effects of shared Visual Context on Collaborative work, *Proc. CSCW2000*, pp.21-30 (2000).
- 11) 尾関基行, 中村裕一, 大田友一: 机上作業シーンの自動撮影のためのカメラワーク, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J86-D-2, No.11, pp.1606-1617 (2003).
- 12) 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 (ISMAR2002)*, pp.246-253 (2002).

(平成 17 年 6 月 1 日受付)

(平成 17 年 11 月 1 日採録)



宮狭 和太 (学生会員)

2004 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工学研究科開放環境科学専攻修士課程に在学中。複合現実感の研究に従事。



坂内 祐一 (正会員)

1978 年早稲田大学理工学部卒業。1980 年同大学大学院修士課程修了。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 年キヤノン (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して現在に至る。当学会 GN 研究会幹事, 論文誌編集委員等を歴任。日本 VR 学会会員。



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等の研究に従事。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。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。情報処理学会フェロー, IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 人工知能学会会員。