

ペッパーズゴーストを用いたMR組立作業支援システム

水流添 弘人^{1,a)} 重野 寛^{1,b)} 岡田 謙一^{2,c)}

受付日 2017年4月17日, 採録日 2017年10月3日

概要: 近年, MR の組立作業支援の実現に最もよく使われるのが HMD (Head Mounted Display) である。ただし, HMD の利用には頭部への負担や視野の狭さ, 映像酔いといった問題点が存在する。そうした問題を解決する技術の 1 つにペッパーズゴーストというガラス等を用いた視覚効果がある。ペッパーズゴーストは裸眼で容易に MR 環境を構築できるため, 3D ディスプレイや仮想物インタラクションに用いられてきた。そこで本論文では, ペッパーズゴーストを実物体指向の組立作業支援に応用した, MR 組立作業支援システムを提案する。HMD を用いた従来システムとの比較実験の結果, 本提案が有用であり, 扱いやすいシステムであることが分かった。これにより, 本提案システムが HMD の問題点を解決した新しい MR 組立作業支援システムを実現しているといえる。

キーワード: 複合現実感, ペッパーズゴースト, 作業支援

MR Work Support System for Assembling Tasks Using Pepper's Ghost

HIROTO TSURUZOE^{1,a)} HIROSHI SHIGENO^{1,b)} KEN-ICHI OKADA^{2,c)}

Received: April 17, 2017, Accepted: October 3, 2017

Abstract: Recently HMD (Head Mounted Display) is often used for the MR work supporting of assembling tasks. However, there are problems for the use of HMD, such as a burden to the head, a narrow view and a motion picture sickness. One of the techniques to solve such a problem is Pepper's ghost which is an optical illusion using a glass. It can create MR environment easily with naked eye, and have been applied for 3D display or interaction with virtual objects. Therefore, in this paper we propose practical MR work supporting system for assembling tasks using pepper's ghost. The experiment which compare our proposal method with the conventional HMD method showed that our proposal method is usual and easy to handle for user. Hence, we created new MR work supporting system for assembling tasks which solve HMD problems.

Keywords: mixed reality, pepper's ghost, work support

1. はじめに

CG (コンピュータグラフィックス) 等の電子データを現実世界に重畳する技術を複合現実感 (MR: Mixed Reality) という。MR はその汎用性の高さから様々な分野で活用されるが, その応用例の 1 つが作業支援である。MR 作業支

援は指示やコツを作業空間上に直接表示でき, 作業者は紙や映像のマニュアルを見ることなく作業できる。したがって, 近年 MR を用いた作業支援の研究が注目を集めている。

MR 作業支援の例として, 複数のパーツを組み上げ 1 つの物体を作る組立作業支援がある。組立作業は車や飛行機, 電子機器等多くの製品を作るうえで重要な工程であるが, 初心者が複雑な組立を行うのは困難である。そのため, 初心者には組立方を指導する指導者や組立方が記されたマニュアルが必要となるが, 指導者を用意するにはコストがかかり, 紙や映像のマニュアルでは指導者がいる場合より習得に時間がかかってしまう。そこで, MR 技術を用いた組立作業支援システムを用いることで, 手間とお金をかけ

¹ 慶應義塾大学

Keio University, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan

² 情報通信メディア研究所

Information Communication Media Laboratory, Toshima, Tokyo 170-0013, Japan

a) tsuruzoe@mos.ics.keio.ac.jp

b) shigeno@mos.ics.keio.ac.jp

c) okada@mos.ics.keio.ac.jp

ることなく、初心者が組立作業を容易に習得することが可能となる。

MR 環境の構築でよく用いられるのがヘッドマウントディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) である。HMD は、頭部に装着するディスプレイのことで、ディスプレイに CG を付加したユーザ視点の映像を映すことで MR 環境を実現する。HMD はフリーハンドの状態では正確な MR 環境を構築できることから、作業支援に向いているが、その使用には欠点もある。まず、HMD の装着はユーザの頭部に負担がかかる。また、HMD のディスプレイでは視野が狭まり、解像度も実際の視界と異なるため、映像酔いを起こす問題が指摘されている。それゆえ、近年は HMD を使わずに MR 環境を構築する手法に注目が集まっている。

こうした手法として、ペッパーズゴーストと呼ばれるガラス等の反射を用いた視覚効果の利用が考えられる。ペッパーズゴーストは古くから演劇等で用いられていた手法で、隠し舞台に置かれた物体にライトを当て、それが観客と舞台の間に設置されたガラスで反射され、あたかも舞台上に物体があるかのように見せることができる技術である。隠し舞台の代わりにディスプレイを用いれば、ガラスの奥の空間に好きな映像を自由に表示させることができる。この手法を用いることで、ペッパーズゴーストはしばしば 3D ディスプレイ、あるいは仮想物インタラクションに用いられてきた。しかし、それを実物体とのインタラクションに応用した例はほとんど存在しない。

本論文では、ペッパーズゴーストを用いた MR 組立作業支援システムを提案する。このシステムはユーザが複数のブロックを 1 つのオブジェクトに組み上げる作業を支援するシステムである。ペッパーズゴーストの特徴を活かし、ユーザに何のデバイスも取り付けさせることなしに作業空間に指示を提示可能となっている。ユーザはアクリル板の奥の空間に手を伸ばし、反射して映っている指示を見ながら組立作業を進める。また、このシステムは実物体ベースのシステムとなっている。実物体に取り付けられたマーカを元に仮想空間を構築しており、ユーザは実物体を実際に動かすことで作業を進め、あるオブジェクトを完成させるようになっている。これは、仮想空間をベースに主に仮想物とのインタラクションを行うシステム [1] とは異なり、実物体をベースにしたシステムとなっている。さらに、システム構成にディスプレイ、アクリル板、PC、ウェブカメラのみしか用いていないためコストもかからず容易に構築できるものとなっている。

本論文では、2 章で MR 作業支援とペッパーズゴーストの関連研究について述べ、3 章で提案システムであるペッパーズゴーストを用いた MR 組立作業支援について述べる。4 章では提案システムのシステム構成と実装について説明し、5 章では実験とその結果について述べ、最後の 6 章でまとめとする。

2. 関連研究

2.1 MR 作業支援

組立作業に対する支援は様々である。Gupta らはレゴブロックの組立指示の作成と提示をリアルタイムに行えるシステムを開発した [2]。このシステムではブロックの組み立て方がリアルタイムにディスプレイに表示されており、ユーザはディスプレイに表示された指示をわざわざ見る必要がある。Henderson らは MR を用いたエンジンの組立作業支援システムを開発した [3]。ユーザは HMD を装着してパーツの周りに表示された仮想指示を見ながら作業を進める。Endo らは MR 組立作業支援とそのオーサリングツールを開発した [4]。このシステムでは、指導者が最初に自身の組立動作の軌跡から指示を作成する。そして出来上がった指示を見ながら作業者は組立作業を行う。2 つのパーツを 1 つに組み上げる際、軌跡の指示は片方の物体を基準に生成され、もう片方を重ねていくことにより作業を進めていく。これらのシステムはすべて有用であるが、HMD を付ける必要がある、また、HMD を用いない組立作業支援として、プロジェクタを用いて作業指示を机に表示させるシステム [5] や、プロジェクションマッピングを利用したものがあるが [6]、これらは作業指示が平面にしか出せず、複雑な組立作業に対応できない。

2.2 ペッパーズゴースト

ペッパーズゴーストはガラス等を用いた視覚効果であり、図 1 にその仕組みを示す。観客から見えない隠し舞台にある実物 A にライトを当てる。すると、実物 A が観客と舞台の間に斜めに設置されたガラス板によって反射され、観客からは A の像が舞台上に見える、というものである。このようにペッパーズゴーストは簡単に仮想物を空間に表示することができるため、MR 技術への応用に注目が集まっている。

近年用いられるペッパーズゴーストの多くが隠し舞台の代わりにディスプレイを用いることで、3D ディスプレイとして活用されている。Sidharta らは 6 層の PDLC フィルムを用いることで 6 段階のペッパーズゴーストによる多重

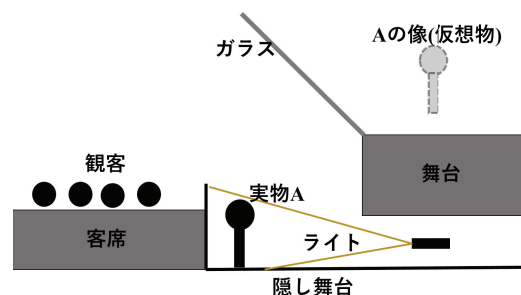


図 1 ペッパーズゴーストの仕組み
Fig. 1 Mechanism of pepper's ghost.

層ディスプレイを開発した [7]。さらに、同時に複数の層のディスプレイに映像を映すことで、リアルな距離情報のあるディスプレイを開発した [8]。Pantojaa らは PDLC フィルムを用いることにより明るい場所でもペッパーズゴーストを実現させた [9]。また、スマートフォンやタブレットを用いた 4 方向の 3D ディスプレイ [10], [11], [12] や、ペッパーズゴーストを利用したヘッドセット等もある [13]。

また、3D ディスプレイではなくペッパーズゴーストを用いたインタラクションの研究も存在する。Tokuda らや Chi らは、ペッパーズゴーストを用いて表示した仮想物を手のジェスチャーで操作できるシステムを開発した [14], [15]。Kim らはプレゼンテーションのための MR 空間をペッパーズゴーストを用いて実現した [16]。Weichel らは MixFab という個人製作のための MR 環境を開発した [17]。これは Holodesk [1] のように卓上のペッパーズゴーストを用いた MR 環境で、ユーザは 3DCG モデルを手で操作、作成し、最終的に 3D プリンタで実物を作るというものである。また、実際の小物を 3D モデル化しデザインに反映させることもできる。これらの研究はすべて、仮想オブジェクトを操作、作成する仮想空間がベースとなるシステムである。

上記のように、ペッパーズゴーストの研究では 3D ディスプレイや仮想物インタラクションのものがほとんどで、組立作業支援といった実物体を操作し作成する研究はほとんどなされていない。

3. ペッパーズゴーストを用いた MR 組立作業支援

3.1 システム概要

本システムはペッパーズゴースト技術を用いることにより裸眼での MR 組立作業支援を実現している [18]。また、初心者が組み方を知らない状態で卓上の組立作業を行う状況を想定する。図 2 にシステムの利用イメージを示す。ペッパーズゴースト技術により空間に表示される CG や映像といった指示を見ながら、ユーザは手を作業空間に伸ばし作業を行う。組立指示はすべて組み上げるパーツと同じ形をした CG イメージである仮想パーツで、組み上げるための軌跡を示している。したがって、ユーザは図 3 に示すように仮想パーツに実際のパーツを重ねていくことで、組立作業を進めることができる。また、本システムには作業の手本となる映像を直接作業空間に表示することができる。図 4 にその様子を示す。映像が直接空間に表示されることにより、ユーザは指導者視点で手本を見ることができ、物体の持ち方や動かし方、組み上がったイメージを確認できる。したがってユーザは、手本映像と CG による指示を切り替えながら、手本映像で大まかなイメージを掴み、CG の指示で正確な向きや位置に組立を行う。

本システムのコンセプトは HMD と同様な MR 環境を、

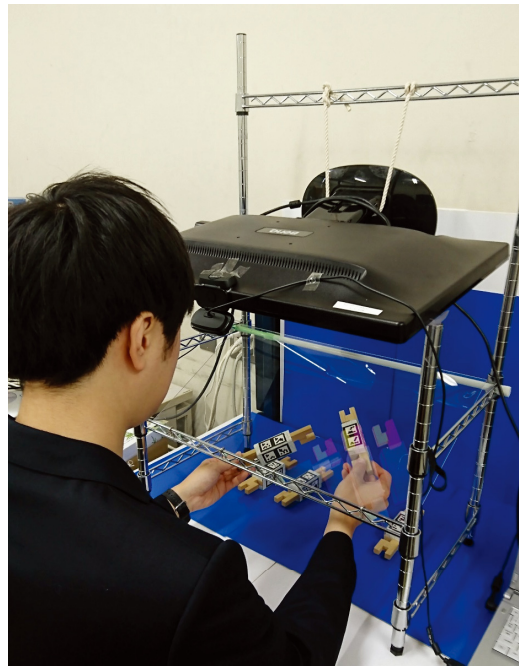


図 2 システムの利用イメージ

Fig. 2 Use image.



図 3 組立作業の流れ

Fig. 3 Procedure to assemble the parts.

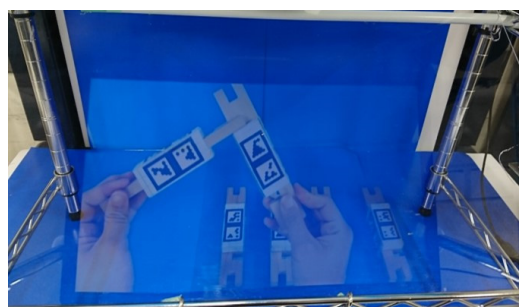


図 4 手本映像の表示

Fig. 4 Display of the model movie.

ペッパーズゴーストを用いることにより裸眼で実現することにある。裸眼で作業を行うことで、ユーザの頭部に負担をかけず、視野を狭めることもなくなる。さらに、本システムは実物体を基準に MR 環境を構築しており、実物体を

組み合わせることで実際のオブジェクトを作成することができる。よって、従来のペッパーズゴーストを用いた仮想空間が中心のシステムに比べ、より実用的な作業を行える、実空間指向のシステムとなっている。また、システム構成がシンプルであるため、ローコストでHMDといったデバイスに比べ容易に構築可能である。

3.2 システム構成

図5に本システムのシステム構成、図6にペッパーズゴースト表示装置を示す。本システムで使用している機材はウェブカメラ、24インチディスプレイ、アクリル板、そしてPCである。ウェブカメラのスペックは1,280×720の解像度、74°の画角で、作業空間の映像を取得しパーツの位置姿勢を測定している。アクリル板はペッパーズゴーストにおけるガラスと同じ働きをしており、装置の上部に取り付け

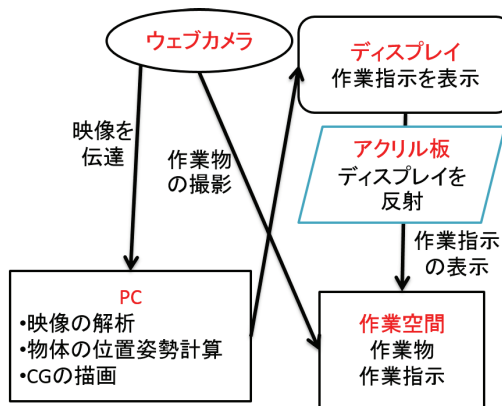


図5 システム構成
Fig. 5 Construction of the system.

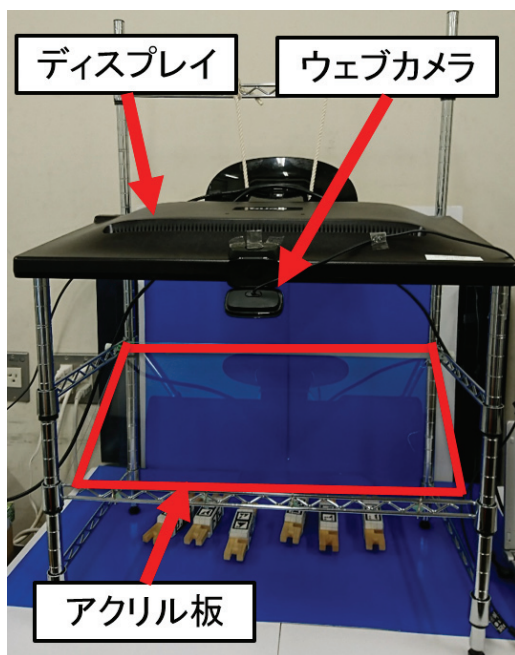


図6 ペッパーズゴースト表示装置
Fig. 6 Display device using pepper's ghost.

られたディスプレイの映像を反射し、作業空間上に映している。したがって、この映し出される仮想ディスプレイの大きさがそのままこのシステムにおける作業空間の広さとなる。図7に表示システムの位置関係を示す。仮想ディスプレイと実際のディスプレイはアクリル板に対して対称でありユーザの目がちょうどアクリル板の法線に来るよう設置されている。また、パーツの位置姿勢はパーツに取り付けられたマーカによって取得している。なおマーカの位置姿勢取得にはキヤノン社のMR Platform IVを利用している。

3.3 仮想パーツの生成

本システムではCGのレンダリングにOpenGLを用いており、一般的な手法と同様にCGは仮想空間上の仮想カメラによって撮影され、描画される。図8に本システムにおける仮想カメラとウェブカメラの関係性を示す。本シ

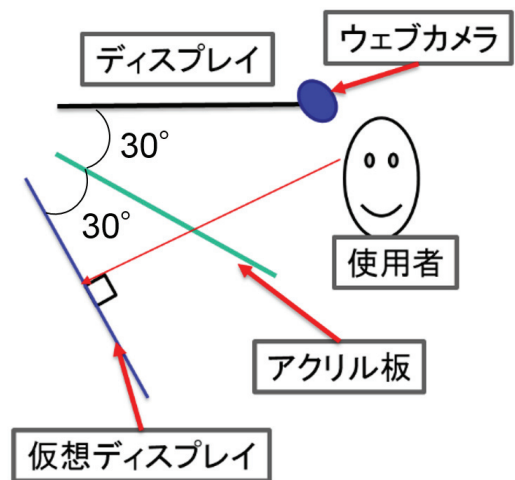


図7 表示システムの位置関係
Fig. 7 Positional relation of the system.

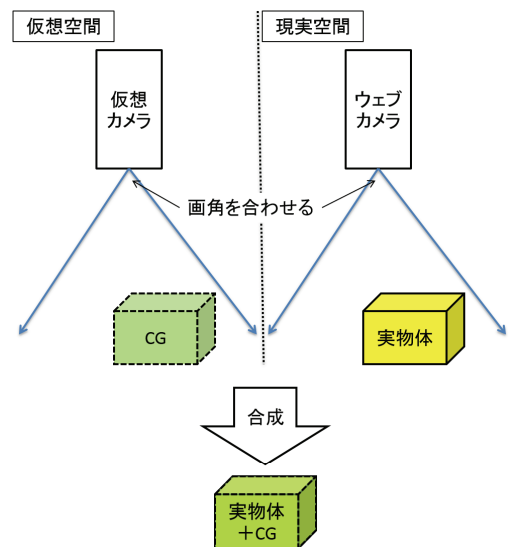


図8 仮想カメラとウェブカメラの関係
Fig. 8 Relation between a virtual camera and a webcam.

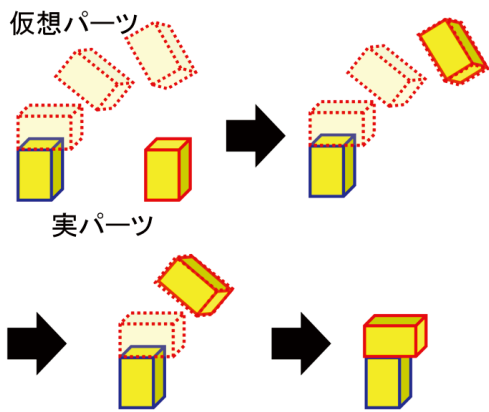


図 9 実パーツと仮想パーツの位置関係
Fig. 9 Relation between real parts and virtual parts.

システムでは、仮想カメラの画角とウェブカメラの画角を合わせることで、仮想空間とウェブカメラで撮影した実空間のスケールを合わせることができる。また、本システムの座標はウェブカメラの位置を原点としているため、マーカーにより取得したパーツの座標に仮想パーツを描画することで、仮想パーツを実際のパーツに重畳して表示させることができる。なお仮想パーツの描画の際、アクリル板の反射に合わせて左右を反転している。

3.4 作業の流れ

図 9 に作業の流れを示す。本システムでは、Endo らの作業支援手法を導入しており、片方のパーツを基準に生成された複数の仮想パーツにもう片方のパーツを重ねることで作業を進めていく。具体的な流れはまず始めに、組み上げる 2 つのパーツのうち 1 つの枠を青色、もう片方を赤色で描画する。それと同時に、赤枠の仮想パーツが青枠の実パーツの位置姿勢を基準に複数生成される。青枠の実パーツを動かすとそれに合わせ仮想パーツも動くので、ユーザはその運動視差により仮想パーツの位置を把握し、赤枠の実パーツをそれらに重ねていく。赤枠の実パーツが仮想パーツに重なると仮想パーツは消え、次に重ねるべき仮想パーツが強調される。ユーザはこうしてパーツを重ねていくことで作業を進め、2 つのパーツが完全に組み込まれた状態になると、また次に組み上げるパーツが青枠、赤枠で表示される。ユーザはこれを繰り返していくことで最終的なオブジェクトを完成させる。なお、先に最後の仮想パーツを消したら、順序にかかわらずすべての仮想パーツが消える。

4. 実装

4.1 仮想パーツの位置姿勢取得

MR Platform IV を用いることで座標原点からマーカーまでの任意の単位ベクトルの移動行列と回転行列を求めることができる。したがって、実パーツの位置姿勢はマーカーを用いることで容易に求められる。しかし、仮想パーツの場



図 10 使用したパーツ
Fig. 10 Parts used for the experiment.

合はその生成の基準となっているパーツの位置姿勢を考慮する必要がある。よって本システムでは、仮想パーツの位置姿勢は基準パーツからの座標と世界座標における基準パーツと仮想パーツの姿勢を入力することにより求めている。しかし、仮想パーツの姿勢は複数の移動行列と回転行列を適用する必要があり複雑な計算を要する。仮想パーツの姿勢が必要となるのは、実パーツとの重畳判定を行う場合のみである。そこで、姿勢を求める代わりに各パーツの基準となる点と少し離れたもう 1 点の 2 点における位置のズレを求めることで、重畳判定を容易な計算で行っている。

4.2 実パーツと仮想パーツの重畳判定

実パーツの位置姿勢は複数貼られたマーカーの中で基準として設定されたマーカーの位置姿勢と同じである。マーカーの中心を第 1 座標、第 1 座標をマーカーの鉛直上方向に 50 mm 平行移動した点を第 2 座標としている。仮想パーツにおいても同様に対応する第 1 座標と第 2 座標を設定し計算する。実パーツと仮想パーツの第 1 座標と第 2 座標それぞれにおいて距離を計算し、それが一定値以下だった場合、重畳がされていると判定している。

5. 評価実験

5.1 実験目的

本実験は提案システムの有用性を検証することを目的とする。卓上組立作業においてペッパーズゴーストを用いた提案手法と HMD を用いた従来手法を比較し、提案手法の提示システムが有用であることを評価した。

5.2 実験内容

本実験のタスクは、6 つの同じ形をしたパーツの組立である。図 10 に使用したパーツ、図 11 に完成形となる 2 種類のオブジェクトを示す。被験者は 16 名で、それぞれ提案手法と従来手法の両方で異なるオブジェクトの組立を行う。2 つのオブジェクトを組み立てる難易度はほぼ同じであり、被験者を表 1 のように 4 つのグループに分け順序効果を考慮した。なお、今回は提案手法の提示システムの有用性を評価するため、手本映像表示機能は用いてい

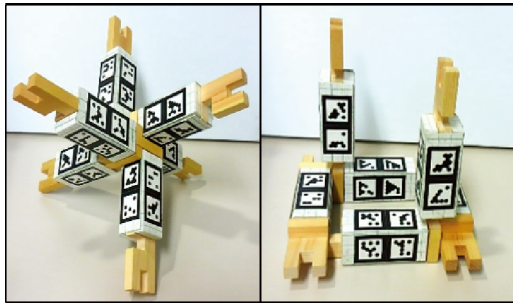


図 11 左：オブジェクト 1，右：オブジェクト 2
Fig. 11 Left: object1, right: object2.

表 1 被験者グループ

Table 1 Groups of the experiment 1 subjects.

グループ	1つ目のタスク	2つ目のタスク
A	提案, オブジェクト 1	HMD, オブジェクト 2
B	提案, オブジェクト 2	HMD, オブジェクト 1
C	HMD, オブジェクト 1	提案, オブジェクト 2
D	HMD, オブジェクト 2	提案, オブジェクト 1

ない。実験を行う前に被験者にはシステムについての説明を口頭で行い、かつ作業を理解してもらうために実際にシステムを簡単に動かしてもらった。また今回比較対象として使用したビデオシースルー型 HMD は VUZIX 社製の WRAP1200AR であり、その解像度は 640×480 で画角は 35° である。

実験の流れは、まず作業指示を元に 2 つのパーツを 1 つに組み上げる。次に、組み上げたパーツをテープで固定する。そして、キーボード操作を行うことで次の組立に移る。これを繰り返していくことでオブジェクトを完成させる。テープの固定作業とキーボード操作は実際の組立作業で典型的な細かい作業を想定したものである。組立ごとに生成する仮想パーツは 3 ステップ分で、仮想パーツは次に重ねるものが白く表示されるようになっている。本実験では定量評価として、全体の作業時間、テープによる固定作業にかかった時間、ミス回数を測定した。テープによる固定作業にかかった時間はパーツを組んでから、キーボード操作をするまでにかかった時間を作業ごとに測定し、それを合計することで求めた。ミス回数は、パーツを組む際間違えた向きや場所で組もうとした回数とした。また、定性評価として被験者には 4 項目 5 段階のアンケートに答えてもらった。

5.3 結果と考察

図 12, 図 13, 図 14 に実験の定量評価の結果を示す。全体の作業時間とテープによる固定作業にかかった時間において t 検定の 1% 水準で有意差が見られた (図 12, 図 13)。また、全体の作業時間からテープによる固定作業にかかった時間を引いた純粋な作業時間においては有意差が見られなかった ($p = 0.11$) (図 14)。このことから、特に細かい

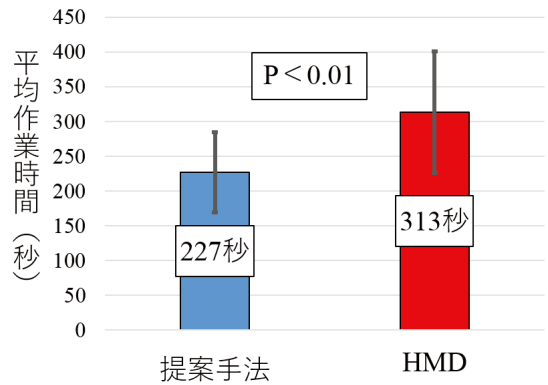


図 12 全体の作業時間

Fig. 12 The whole work time.

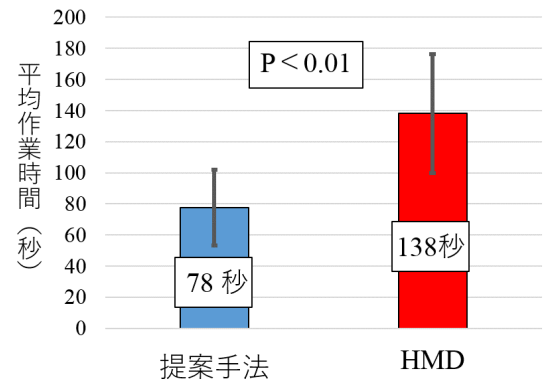


図 13 テープによる固定作業にかかった時間

Fig. 13 The fixing work time.

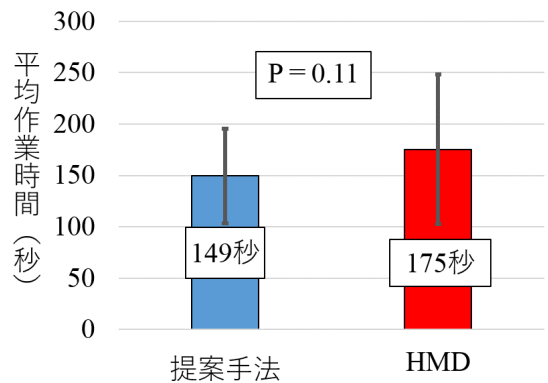


図 14 純粋な作業時間

Fig. 14 The pure work time.

作業において提案手法の方がより作業効率が良いことが分かった。この要因として、今回使用したビデオシースルーの HMD を通すと解像度の問題から細かい部分が見づらいことがあげられる。また、視野角が狭いため、周りを見回す際頭を大きく動かさないといけないことも要因として考えられる。これらが原因となって、テープ貼りにおいてうまく貼れず、貼り直しを行う被験者やキーボードの押し間違えをする被験者がいた。

ミス回数において有意差は見られなかった ($p = 0.75$) (図 15)。今回の実験タスクではミスが生じにくく、ミスをする被験者が少なかったため有意差が出なかったと考え

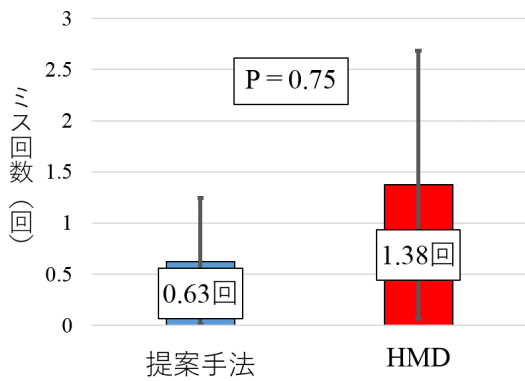


図 15 ミス回数

Fig. 15 The number of mistake.

表 2 アンケート結果

Table 2 Result of the questionnaire.

アンケート内容	提案	HMD
作業はスムーズに行えたか	4.6	2.9
仮想物は立体的に見えたか	4.3	4.1
テープ、キーボード操作は行いやすかったか	5.0	1.8
作業を通して疲れを感じたか	1.2	4.0

1. まったくそう思わない~5. 強くそう思う

られる。

アンケートの結果は表 2 のようになった。「作業はスムーズに行えたか」、「テープ、キーボード操作は行いやすかったか」、「作業を通して疲れを感じたか」の 3 つの項目においてマン・ホイットニーの U 検定の 1% 有意水準で有意差が見られた。「作業はスムーズに行えたか」と「テープキーボード操作は行いやすかったか」の 2 つの項目に関しては HMD の視野の狭さが原因になっていると考えられる。被験者の何名かはパーツに付いているマークがしばしば HMD の視界の外に出てしまい、仮想パーツのズレや作業自体が困難となる原因となったと述べている。「作業を通して疲れを感じたか」の項目においては、HMD の重さが原因であると考えられる。これらより、本提案システムが使用者にとって従来システムより扱いやすいことが分かった。また、「仮想物は立体的に見えたか」の項目において有意差は見られなかった。

3 章で述べたように本システムにおける作業空間の面積はディスプレイの大きさに、高さはアクリル板の高さに制限されてしまう。アンケートには自由記述欄があり、記入内容の例として作業範囲が狭かったことがあげられると被験者すべてに伝えたところ、すべての被験者が問題にはならなかったもしくは、気にはなったが作業に影響は出なかったと答えた。

本実験より、卓上の組立作業支援において今回使用した HMD に比べると、提案システムが優れていることが分かった。HMD は頭部に装着し、目のディスプレイを見るという特性上、重さから頭部に負担がかかり、解像度や

画角は裸眼の状態より劣る。比較実験で差異が見られたのはすべての HMD に共通の特性が原因であると考えられる。また、卓上組立支援における指示はシンプルなものであるため、解像度画角といったスペックの向上はあまり影響を及ぼさないと考えられる。したがって、より性能の良い HMD を利用した場合であっても、提案の優位性が示せると考えられる。

6. おわりに

近年、MR は実物体に対し直接指示を重畳できるという点で作業支援等によく用いられている。MR 環境の実現において最も一般的に用いられるデバイスが HMD であるが HMD の使用には問題点もいくつかある。頭部に装着するという性質上違和感や疲労が溜まりやすく、視野角や解像度も裸眼の状態と異なる。

そこで、ペッパーズゴーストを用いた裸眼 MR 作業支援を提案した。ペッパーズゴーストとはガラスやアクリル板の反射で仮想物を重畳する技術のことで、3D ディスプレイやホログラム実現のためによく用いられている。本提案では、そのペッパーズゴーストを作業支援に応用し、裸眼で MR 環境を実現し作業支援を行うことができる。そして、仮想パーツを用いた細かい作業指示と手本映像による大まかな指示を組み合わせることで、初心者でも扱いやすいシステムとなっている。

提案手法と HMD を用いた従来手法との比較実験を行ったところ、全体の作業時間とテープにより固定作業にかかった時間において有意差が見られ、純粋な作業時間において有意差が見られないという結果が得られた。このことから、特に細かい作業において提案手法のほうがより作業効率が良いことが分かった。この要因として HMD の解像度の低さや視野角の狭さが考えられる。また、ミス回数において有意差が見られなかった。今回の実験タスクではミスが生じにくく、ミスをする被験者が少なかったため有意差が出なかったと考えられる。さらに、アンケートより「作業はスムーズに行えたか」「テープ、キーボード操作は行いやすかったか」、「作業を通して疲れを感じたか」の 3 つの項目において有意差が見られた。このことから提案システムが HMD より扱いやすいことが分かる。これは HMD の視野の狭さと重さが原因であると考えられる。また、「仮想物は立体的に見えたか」の項目において有意差は見られなかった。本実験より、今回使用した HMD に比べ、提案システムが優れていることが分かった。その原因は HMD の特性によるものであり、他の HMD を利用した場合でも提案の優位性が示せると考えられる。

以上より、HMD システムより優れた新しい MR 組立作業支援システムが実現できたといえる。

参考文献

- [1] Hiliges, O., Kim, D., Izadi, S., Weiss, M. and Wilsn, A.: Holodesk: Direct 3D interactions with a situated seethrough display, *Proc. CHI '12* pp.2421-2430 (2012).
- [2] Gupta, A., Fox, D., Curless, B. and Cohen, M.: Duplo-track: A real-time system for authoring and guiding duplo block assembly, *Proc. UIST '12*, pp.389-402 (2012).
- [3] Henderson, J.S. and Feiner, K.S.: Augmented reality in the psychomotor phase of a procedural task, *Proc. ISMAR '11*, pp.191-200 (2011).
- [4] Endo, H., Furuya, S. and Okada, K.: MR manual and authoring tool with afterimages, *Proc. AINA '15*, pp.890-895 (2015).
- [5] Tsukada, K., Watanabe, K., Akatsuka, D. and Oki, M.: FabNavi: Support system to assemble physical objects using virtual instructions, *10th Fab Lab Annual Meeting* (2014).
- [6] 橋本菜摘, 椎尾一郎: StdI/O: プロジェクションマッピングによるトイブロックの組立・記録支援, *情報処理学会論文誌*, Vol.57, No.12, pp.2577-2588 (2016).
- [7] Sidharta, R., Hiyama, A., Tanikawa, T. and Hirose, M.: The development of multi-depth pepper's ghost display for mixed reality system, *Proc. ICAT '06*, pp.115-118 (2006).
- [8] Sidharta, R., Hiyama, A., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Volumetric display for augmented reality, *Proc. ICAT '07*, pp.55-62 (2007).
- [9] Pantojaa, G., Gonzales, E.M., Flores, R.F.P., Wandenb, S.F. and Hendrichs, N.: Use of PDLC Film for Improving Visualization of Contents in Holographic Display Under Different Illumination Scenarios, *Proc. VARE '15*, pp.151-160 (2015).
- [10] Degli, M., Petrich, J., Kim, R., Vora, N. and Lee, A.: Corus: A Holographic Candle System with Intuitive Gestural Interaction and Ambient Feedback to Promote Co-Sleeping, *Proc. TEI '17*, pp.571-577 (2017).
- [11] Thap, T., Chung, H. and Lee, J.: Heart Activity Monitoring Using 3D Hologram Based on Smartphone, *Proc. EMBC '16*, pp.5339-5342 (2016).
- [12] Kasomoulis, A., Vayanou, M., Katifori, A. and Ioannidis, Y.: MagicHOLO - A Collaborative 3D experience in the museum, *Proc. PCI '16* (2016).
- [13] Angeli, D.D. and O'neill, E.: Human or Machine Perspective? Throwing "Light" on Optical See-Through Headsets in Museums, *Proc. UbiComp '16*, pp.1503-1508 (2016).
- [14] Tokuda, Y., Hiyama, A., Hirose, M. and Yamamoto, H.: R2d2 w/ AIRR: Real time & real space double-layered display with aerial imaging by retro-reflection, *Proc. SIGGRAPH Asia '15*, No.20 (2015).
- [15] Chi, H.F., Zi, S.S., Billinghamurst, M. and Esmaeili, H.: PepperGram With Interactive Control, *Proc. VSMM '16* (2016).
- [16] Kim, M., Lee, J., Stuerzlinger, W. and Wohn, K.: HoloStation: Augmented Visualization and Presentation, *Proc. SIGGRAPH Asia '16*, No.12 (2016).
- [17] Weichel, C., Lau, M., Kim, D., Villar, N. and Gellersen, H.: MixFab: A mixed-reality environment for personal fabrication, *Proc. CHI '14*, pp.3855-3864 (2014).
- [18] Tsuruzoe, H., Odera, S., Shigeno, H. and Okada, K.: MR Work Supporting System Using Pepper's Ghost, *Proc. ICAT-EGVE '16*, pp.61-68 (2016).



水流添 弘人 (学生会員)

2016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修士課程在学中。グループワーク支援の研究に従事。



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。現在、同大学理工学部教授。博士(工学)。情報処理学会学論文誌編集委員, 同高度交通システム研究会幹事, 電子情報通信学会英文論文誌B編集委員等を歴任。現在, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会主査, Secretary of IEEE ComSoc APB. ネットワーク・プロトコル, ITS等の研究に従事。著書『ユビキタスコンピューティング』(オーム社), 『情報学基礎第2版』(共立出版)等。電子情報通信学会, IEEE, ACM各会員。



岡田 謙一 (正会員)

慶應義塾大学名誉教授, 工学博士。専門は, CSCW, グループウェア, HCI。情報処理学会理事, 情報処理学会誌編集主査, 論文誌編集主査, GN研究会主査, 日本VR学会理事等を歴任。現在, 情報処理学会監事, 情報処理学会論文誌: デジタルコンテンツ編集長, 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年), 情報処理学会40周年記念論文賞等を受賞。日本VR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。本会フェロー。