

研究論文

MR組立作業支援システムにおける アナモルフォーズとプロジェクションマッピングの利用

水流添 弘人^{1,a)} 重野 寛^{1,b)} 岡田 謙一²

受付日 2017年7月12日, 採録日 2017年11月20日

概要: 近年, 複合現実感 (Mixed Reality: MR) を用いた組立作業支援の研究に注目が集まっている. しかし MR 組立作業支援において, 最もよく利用されるデバイスである HMD (Head Mounted Display) の利用は頭部への疲労や解像度の違いによる映像酔い等の問題点がある. そこで, 本論文では HMD を用いずに MR 環境を構築する手法として, アナモルフォーズとプロジェクションマッピングという 2 つの技術に着目し, それらを用いた MR 組立作業支援システムを提案する. アナモルフォーズとは, ある絵を特定の角度から見ると, 立体的に見せることのできるトリックアートである. この技術により, 組立作業の指示を空間に表示させ, ユーザの作業を支援する. ただし, アナモルフォーズのみでは, 正確な位置を伝達できないため, 細かい位置姿勢の指示を作業物に対するプロジェクションマッピングで行う. HMD を用いたシステムとの比較実験の結果, 本提案システムが有用で扱いやすいシステムであることが分かった. これより, 提案システムが HMD の問題点を解決した有用な 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, 組立作業支援, アナモルフォーズ, プロジェクションマッピング

MR Work Supporting System for Assembling Tasks Using Anamorphosis and Projection Mapping

HIROTO TSURUZOE^{1,a)} HIROSHI SHIGENO^{1,b)} KEN-ICHI OKADA²

Received: July 12, 2017, Accepted: November 20, 2017

Abstract: Recently, studies of MR (Mixed Reality) work support system for assembling tasks attract attention. In such work supports, HMD (Head Mounted Display) is often used. However, it also has some disadvantages such as burdens for user's head and a motion picture sickness caused by the resolution of HMD. Therefore, we focus on anamorphosis and projection mapping to construct MR environment, and propose MR work support system for assembling tasks using them. Anamorphosis is the trick arts that enable user to see pictures stereopsis. We use it and display instructions of assembling tasks for support user's works. However, anamorphosis can't show narrow and accurate instructions. Hence, we use projection mapping technique to show them. The experiment which compare our system and conventional HMD system showed that our system is useful and easy to handle. Therefore, we realize useful MR work support system for assembling tasks that solve problems caused by HMD.

Keywords: mixed reality, work support for assembling tasks, anamorphosis, projection mapping

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

1. はじめに

近年, 複合現実感 (Mixed Reality: MR) に関する研究が多くなされている. MR とは現実世界上にコンピュータグラフィックス等の仮想物を重畳する技術であり, その汎用性の高さからエンタテインメントから作業支援まで幅広く

用いられている。なかでも組立作業の支援においては、作業内容を図や文字を用いずに直観的な指示が伝達可能であるため、大きく作業効率を上げることができ、注目が集まっている。そうしたMRを用いた組立作業支援に最もよく使用されるデバイスがHMD (Head Mounted Display) である。HMDは頭部に装着するディスプレイで、自分の視界上の現実世界にCGの仮想物を合成することができる。しかしながらHMDは頭部や目に疲労が溜まりやすいうえ、頭部の動きに対して映像に遅延が生じるため、映像酔いの原因にもなる。さらに、映像の解像度が低く、細かい作業が行いにくい。

このようにHMDには多くの問題点が存在しているため、HMDを用いずに空間に仮想物を重畳する手法に需要がある。そうした手法に関する研究は多くなされているが、その多くが空間上に何らかの形でスクリーンとなる物質を配置するものである。たとえば、霧や超音波による粒子浮揚等により実現されてきた空間ディスプレイはエンタテインメント等へ応用されている [1], [2], [3]。しかし、空間上にディスプレイとなる物質を浮遊させる従来の空間ディスプレイはその物質が作業の妨げとなるため、組立作業支援での使用に向かない。

そこで本論文ではアナモルフォーズとプロジェクションマッピングを用いて裸眼での作業支援を可能とするシステムを提案する。アナモルフォーズとはある平面に描かれた絵を特定の角度から見たときのみ立体的に見えるというトリックアート的一种である。これとヘッドトラッキングを組み合わせて、つねに立体視できるように制御することでMR環境を実現できる。この手法を用いることで組立作業における作業物の動かし方の指示を作業空間に表示することができる。この際、実物体の1点を原点としてそれを基準に仮想物を表示する物体座標の概念を導入することで立体感を高めている。しかし、アナモルフォーズはあくまでも人の目の錯覚を用いた手法なので大まかな動かし方しか伝達できず、作業支援には不十分である。そこで作業物体に対するプロジェクションマッピングによる指示も用意し、これにより作業物体の細かい位置姿勢を伝達する。本提案システムではこの2つの指示を切り替えることで円滑な組立作業支援を可能にする。

以下2章でMR組立作業支援と空間ディスプレイについての関連研究について述べ、3章で提案システムであるアナモルフォーズとプロジェクションマッピングを用いたMR組立作業支援システムについて述べる。4章では提案システムの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、6章でまとめとする。

2. 関連研究

2.1 MR組立作業支援

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 [4]。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 [5]。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 [6]。このシステムでは、指導者が最初に自身の組み立て動作の軌跡から指示を作成する。そしてでき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。これらのシステムではHMDの利用により、動画のマニュアルより優れた作業支援を実現しているが、HMDの欠点には着目していない。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 [7] や、プロジェクションマッピングを利用したものが [8]、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 空中ディスプレイ

HMDを用いずに裸眼でMR環境をする手段として空中ディスプレイがある。空中ディスプレイは大きく分けて、光を空中で結像させ直接映像を宙に浮かせる手法と、スクリーンとなる物体を空中に浮かせ、プロジェクタ等で投影する手法の2つがある。空中に像を結像させる手法としてレーザを用いるものがある [9]。これは、非常に強力なレーザを光源として用いることで空間に複数の光の点を表示し、特定の形を表現するものである。Ochiaiらは、このレーザ光源を極微小時間のパルスで投射することで触れられる空中ディスプレイを開発した [10]。こうしたレーザを使用した空中ディスプレイは、特殊な機材が必要となるほか、表示可能な範囲が狭く、組立作業支援には向いていない。また空間に直接スクリーンを浮かせる研究として、微粒子を超音波で浮遊させ、スクリーンとして利用するもの [1] や、霧を発生させそこに映像を投影するフォグスクリーン [2], [3]、呼気を利用した小型スクリーン [11]、シャボン膜をディスプレイに使用するもの [12] 等がある。しかしこれらは、宙に浮いたスクリーンとのインタラクションを行うことができず、組立作業支援には応用できない。

2.3 プロジェクションマッピングとアナモルフォーズ

以上であげたように裸眼でMR環境を構築可能な空中ディスプレイであってもその多くは組立作業支援には応用できないものであった。そこで、本論文ではプロジェクションマッピングとアナモルフォーズという2つの技術に着目した。

プロジェクションマッピングとは、物体をスクリーンとして映像を直接投影することでその物体の表現拡張を行える技術である。奥村らは高速で動く物体に対してプロジェクションマッピングを行う手法を提案した [13]。Leithingerらは形を変える机型ディスプレイを用いた遠隔コミュニケーションツールを開発した [14]。小池らは水面にプロジェクションマッピングをすることでインタラクティブなディスプレイを実現した [15]。このようにプロジェクションマッピングは様々な分野に活用されており、組立作業支援への応用も期待されている。

アナモルフォーズは一見すると歪んだ絵であるが、ある条件下で見ると別のものに見せたり立体的に見せたりすることのできる視覚トリックである。その手法には円筒鏡を用いることで正しく見えるものと特定の角度から見ることで立体的に見えるものの2種類あるが、ここでは前者を円筒鏡アナモルフォーズ後者をアナモルフォーズとする。須賀らは円筒鏡の中に2本のタッチペンを仕込み、ipadに円筒鏡アナモルフォーズを用いることで立体的なオブジェクトを表現することを可能にした [16]。またAraùjoらはアナモルフォーズにヘッドトラッキングを導入することで常時立体視可能なディスプレイを実現し、3Dモデリングを行えるシステムを開発した [17]。このようにアナモルフォーズを用いた研究は複数存在しているが、組立作業支援に応用しているものは存在しない。しかし、アナモルフォーズをあくまで大まかな指示にのみ使い、細かな指示には他の手法を用いれば、組立作業支援にも活用できると考えられる。

3. MR組立作業支援におけるアナモルフォーズとプロジェクションマッピングの利用

3.1 システム概要

本システムでは組立作業の指示にアナモルフォーズとプロジェクションマッピングを用いることでMR組立作業支援を実現する。図1にアナモルフォーズによる指示の様子、図2にプロジェクションマッピングによる指示の様子を示す。アナモルフォーズによる指示は机上と壁面の2面に投影される映像で、パーツをどのように動かすかがパーツと同じ形のCGを複数出すことにより立体的に分かるようになっている。ここではこのCGの指示を仮想パーツと呼ぶ。ユーザは図3に示すように、パーツをその指示に重ねながら動かしていくことで作業を進めることができる。ただし、あくまでもアナモルフォーズによる指示は平面の映像なので、正確な位置を伝えることは難しい。そこで、パーツが仮想パーツにある程度近づくと、自動的にパーツに対するプロジェクションマッピングによる指示に切り替わる。ユーザはプロジェクションマッピングにより表示されたパーツの枠のCGにパーツをぴったり重ねるように動かすことで、パーツを正しい位置姿勢にすることが

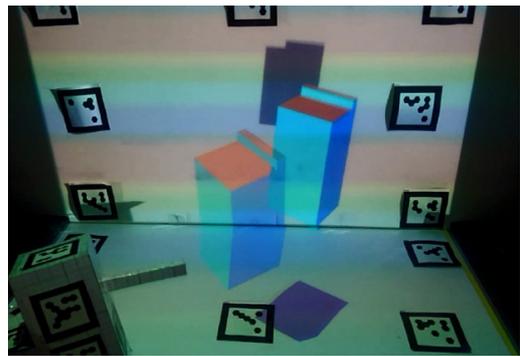


図1 アナモルフォーズによる指示
Fig. 1 Instructions of anamorphosis.

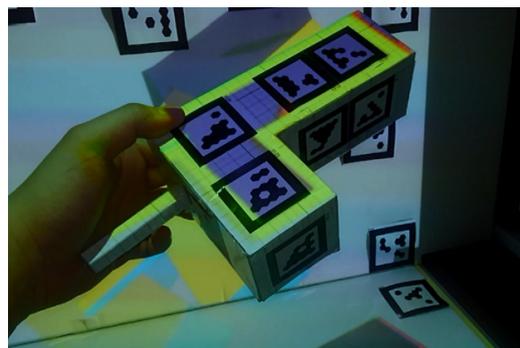


図2 プロジェクションマッピングによる指示
Fig. 2 Instructions of projection mapping.

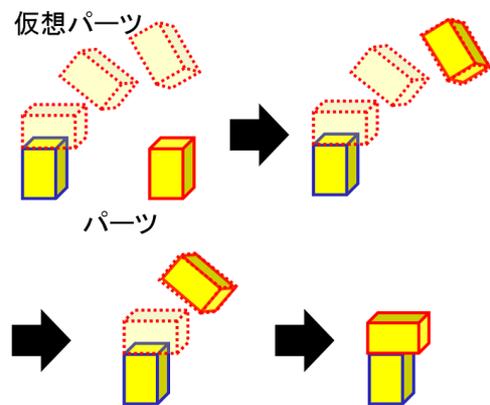


図3 組立作業の流れ
Fig. 3 Flow of assembling tasks.

できる。CGとパーツが重なるとCGは消え、ユーザは次のアナモルフォーズによる仮想パーツに重ねるように作業を進める。このように、アナモルフォーズによる大まかな指示とプロジェクションマッピングによる細かい指示を自動的に切り替えることで、ユーザはパーツを正しく動かし、組立作業を行うことができる。

本システムはHMDで実現できる組立作業における指示と同等なものをアナモルフォーズとプロジェクションマッピングを用いることで実現することができる。ユーザは裸眼で作業を行うことができるため、HMDで問題となって

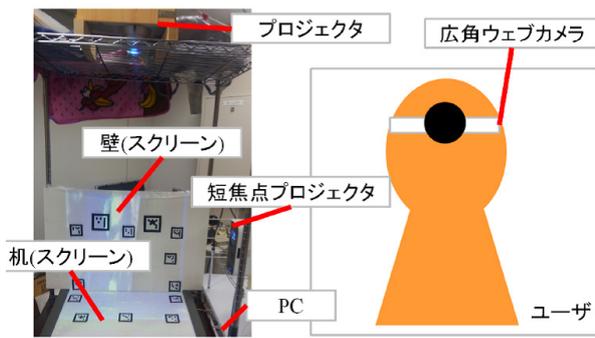


図 4 システム構成
Fig. 4 System structure.

いた、頭部への負担や映像酔い、解像度の違いによる細かい作業のし辛さを解決している。

3.2 システム構成

本システムのシステム構成を図 4 に示す。本システムにおける作業空間は机と壁で囲まれた空間である。作業空間の上部に設置されたプロジェクタで机上へ、横に設置した短焦点プロジェクタで壁面へ作業指示を投影している。ユーザが頭部に装着するウェブカメラは、机上や壁面に貼り付けられたマーカや作業物に貼り付けられたマーカを読み取っており、PC 上でユーザやパーツの位置姿勢を計算し、認識する。なお、ユーザの視界とカメラの撮影範囲のズレを抑えるため、120 度の広角ウェブカメラを使用した。また、マーカの認識から位置姿勢の計算には Canon 社の MR Platform IV を利用した。

3.3 組立作業指示

3.3.1 アナモルフォーズによる指示

本システムではユーザの頭部の位置を検出することで、つねに指示が立体視できるよう映像を投影している。アナモルフォーズは平面の絵を人間の目の錯覚により立体的に見せているため、両眼視差による立体感は得られない。そこで、本システムでは運動視差の要素を指示に加えることで立体感を向上させている。運動視差とは物と人の目の関係性が変化することによる視差効果であり、人は視界にある物体の動きの違いから奥行きを知覚することができる。本システムでは図 5 に示すように片方のパーツを基準にして CG の仮想パーツを生成している。左下に映っているパーツの向きを変えることで、それを基準としている 2 つの仮想パーツの位置姿勢も大きく変わっていることが分かる。このように基準となるパーツを動かすことで仮想パーツも動くため、運動視差が生まれ、立体感を得られるようになっている。さらに、壁と机に作業指示の影を投影することで、作業指示の位置認識の補助としている。以上により、両眼視差による立体感には劣るが基準となるパーツからの位置関係からそのパーツの大まかな位置は認識するこ

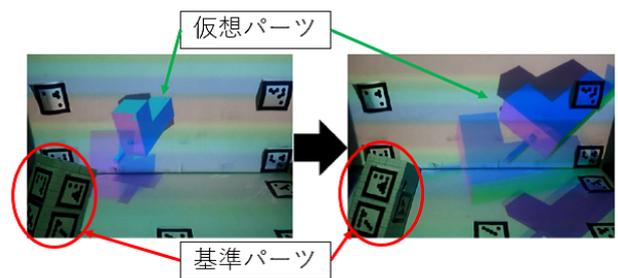


図 5 運動視差効果
Fig. 5 Motion parallax effect.

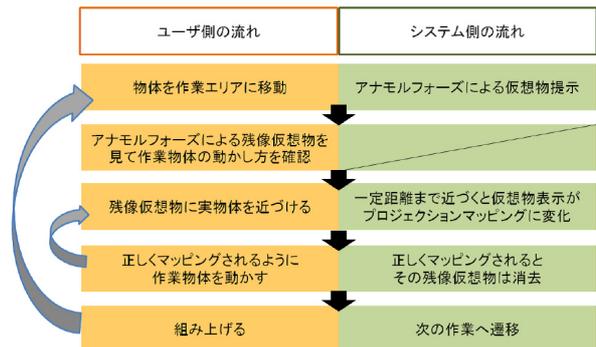


図 6 ユーザの作業とそれにとまうシステムの動作
Fig. 6 User's work and operation of the system.

とができる。

3.3.2 プロジェクションマッピングによる指示

作業指示である仮想パーツが近づくとアナモルフォーズによる指示からプロジェクションマッピングによる指示に切り替わる。プロジェクションマッピングの指示は上部のプロジェクタから作業物に直接投影され、パーツが正しい位置姿勢になると、正しく重なるようになっていく。指示とパーツが重なると指示は消え、ユーザは次の指示にパーツを動かしていく。なおこの際、パーツのマーカが CG で隠れてしまわいように、指示の CG はパーツの枠で示している。

3.4 作業の流れ

図 6 にシステムの流れユーザの作業とそれにとまうシステムの動作を示す。本システムでは、Endo らのシステム [6] における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仮想パーツを重ねることで作業を進めていく。具体的には、ユーザはまず組み立てる 2 つのパーツを手に取り作業空間に移動させる。このとき 2 つのパーツのうち片方を基準パーツ、もう片方を作業パーツとする。基準パーツが作業空間に入ると、基準パーツを基準とした作業パーツと同じ形をした複数の CG でできた仮想パーツが表示される。仮想パーツはアナモルフォーズにより提示されており、基準パーツに対する作業パーツの動かし方を表すように配置

されている。ユーザが仮想パーツに作業パーツを近づけると、プロジェクションマッピングによる指示に切り替わり、ユーザは細かい位置調整をし、作業パーツを仮想パーツに重ねていく。このようにユーザはパーツを動かしていき、最後の仮想パーツに作業パーツを重ねると基準パーツと作業パーツが組み上がった状態になる。そして、次のパーツを手に取り作業空間に移動して同様に組み立てを行っていく。ユーザはこの流れをすべてのパーツが組み上がるまで繰り返していく。

4. 実装

4.1 仮想パーツの生成

4.1.1 アナモルフォーズによる生成

図 7 にアナモルフォーズによる指示の生成方法を示す。アナモルフォーズによる指示の原理は CG 表現における影の生成手法と同様である。CG における影の描画は射影変換によって行われ、光源と物体の各点を結ぶ線の延長線上にある壁や床に色を付けることで描画している。本システムでは、光源にあたる座標をユーザの視点位置に設定し、影と同様に壁や床に描画をすることでアナモルフォーズを実現している。

このように、本システムでは射影変換を用いた影の描画手法を応用しているため、基本的に CG はすべて平面上に描画されている。そこで、ユーザに認識させたい本来の座標情報を基に、前後関係を保つよう実装した。

4.1.2 プロジェクションマッピングによる生成

図 8 にプロジェクションマッピングによる指示の生成方法を示す。プロジェクションマッピングによる描画は上部に設置されたプロジェクタのみで行われる。この指示においては、作業パーツが正しい位置姿勢になるとぴったりと重なるような枠の CG を表示する必要がある。したがって、先ほど同様影の描画手法を応用することで実現できる。プロジェクタの位置を光源として設定し、作業パーツを重ねたい位置姿勢になるように枠を描画する。

4.2 パーツの位置姿勢取得と重畳判定

実物のパーツの位置姿勢はパーツに複数取り付けられた

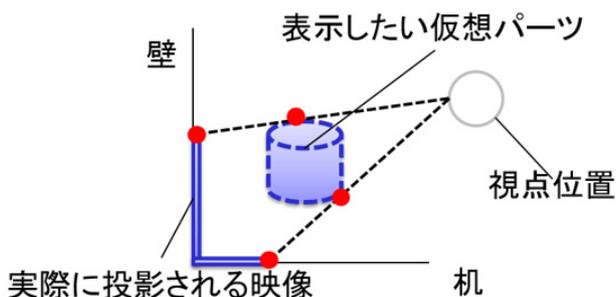


図 7 アナモルフォーズによる指示の生成原理

Fig. 7 Principle of instructions created by anamorphosis.

マーカーの中で基準として設定されたものの位置姿勢と同じである。そのため、そのマーカーの位置姿勢を認識することで求めている。本システムではある物体の 1 点を原点とする物体座標を用いて仮想パーツの座標を決定している。したがって、仮想パーツの座標は基準となるパーツの座標と物体座標における仮想パーツの座標より求めている。

本システムでは、作業パーツと仮想パーツの重畳判定は、図 9 に示す第 1 座標と第 2 座標という 2 点を作業パーツ仮想パーツそれぞれに対し設定した。第 1 座標は位置姿勢の基準となるマーカーの中心に、第 2 座標は第 1 座標から x 軸、y 軸方向に同じ値だけ移動させ、30 mm 離れた位置に設定した。作業パーツと仮想パーツの第 1 座標の距離を計算し、第 2 座標に関しても距離を計算して、2 つの距離の和を求めた。2 つの距離の和が 60 mm 以下になると、アナモルフォーズの指示からプロジェクションマッピングの指示に切り替わり、10 mm 以下になると 2 つは重畳されると判定する。

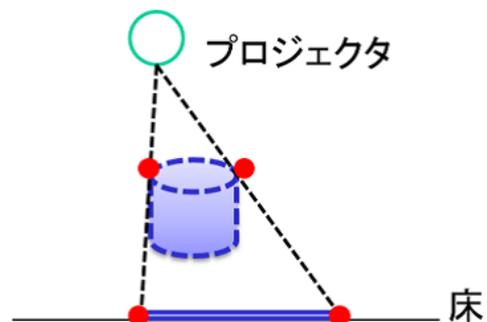


図 8 プロジェクションマッピングによる指示の生成原理

Fig. 8 Principle of instructions created by projection mapping.

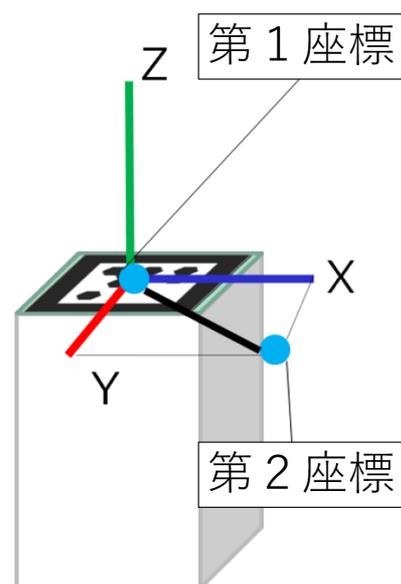


図 9 第 1 座標と第 2 座標

Fig. 9 The first and second points.

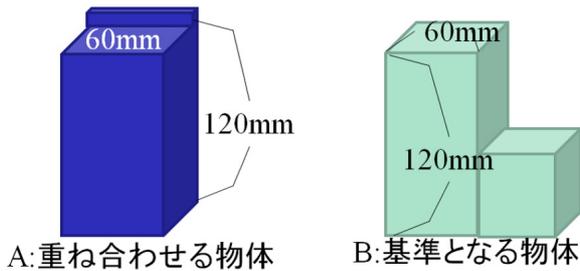


図 10 予備実験で用いたパーツ
Fig. 10 Parts used in the preliminary experiment.

5. 評価実験

5.1 実験目的

本実験では提案システムである、アナモルフォーズとプロジェクションマッピングを用いたMR組立作業支援の有用性を評価することを目的とする。予備実験では本システムにおけるアナモルフォーズによる指示の提示精度を検証し、評価実験ではHMDを用いたシステムと本システムとの比較により本システムの組立作業における効率を検証した。

5.2 予備実験

5.2.1 予備実験：実験内容

予備実験のタスクは、アナモルフォーズにより表示された仮想パーツに対する、作業パーツを重畳である。被験者はアナモルフォーズにより表示された指示だけで作業パーツを動かす。そして、被験者が動かした位置と正しい位置との距離を測定することで、アナモルフォーズの指示の精度を検証する。被験者は本システムに習熟しており、実験に用いたパーツは図10に示す2つである。

タスクの流れを説明する。被験者はまず、2つのパーツを手に取り作業空間に移動する。実験開始の合図とともに基準パーツをもとに仮想パーツがランダムに1カ所提示される。被験者は基準パーツを動かし仮想パーツのおおよその位置姿勢を認識する。そして、作業パーツを仮想パーツに重ねるように動かす。この際、仮想パーツと作業パーツの位置関係を見比べて位置を認識しないよう作業パーツは一気に動かし、その後は動かさないようにする。実験開始から5秒後に仮想パーツと作業パーツの距離、傾きの差とプロジェクションマッピングによる指示に切り替わったかを測定する。仮想パーツと作業パーツの距離は基準となるマーカの中心となる点の距離より求め、傾きの差はそのマーカの傾きより求めた。以上の過程を10回繰り返しデータを計測した。

5.2.2 予備実験：結果と考察

表1に実験の結果を示す。表に示す値は平均値±標準偏差となっている。この結果より、絶対評価ではあるがア

表 1 予備実験の結果

Table 1 Results of the preliminary experiment.

距離 [mm]	傾きの差 [度]	切り替え [回]
50.6 ± 32.9	9.7 ± 7.0	8/10 回

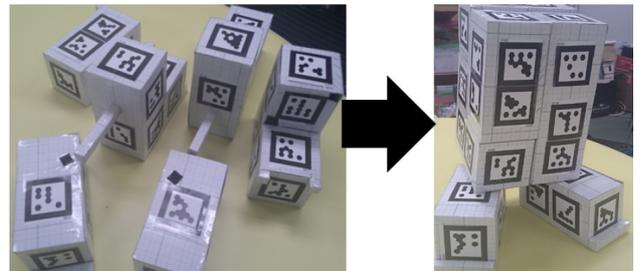


図 11 評価実験で用いたパーツと組み上げるオブジェクト
Fig. 11 Parts and the object used in the experiment.

ナモルフォーズによる指示により大まかな位置姿勢伝達ができていることが分かる。実際に作業を行う場合は、作業パーツと仮想パーツを見比べながら重ねることができるため、より高精度に位置姿勢を伝達できる。以上より、アナモルフォーズによる指示の提示は大まかな位置姿勢伝達という役割を十分に果たせる精度であるといえる。

5.3 評価実験

5.3.1 評価実験：実験内容

評価実験のタスクは6つの異なるパーツの組み立てである。図11に使用した6つのパーツと組み上げるオブジェクトを示す。比較対象として既存手法であるHMDを用いた組立作業支援システムを用意した。HMDを用いたシステムを選んだ理由は、Hendersonらの研究[5]やEndoらの研究[6]より、HMDを用いたシステムが動画のマニュアルより優れていると結果が出ており、HMDのシステムより優れていれば動画のマニュアルより優れていることが分かると考えられるからである。HMDを用いたシステムでは、提案システムと同様に仮想パーツによる指示がHMDによるMR空間上に表示されている。したがって、作業の進め方も提案システムと同様であるが、HMDによる指示は両眼視差による立体視を実現しているため、パーツに対するマッピングの指示は行っていない。被験者は18名で2つのグループに分けている。片方は提案システムの後にHMDを用いたシステムで、もう片方はHMDのシステムの後に提案システムで実験を行った。なお、2つのシステムでの実験は1カ月半ほど間を空けている。今回比較対象として使用したHMDはCANON社製のVH-2002であり、その解像度は640×480、水平視野角51度、重量は約400gである。

実験の流れを説明する。まず、被験者にはシステムに十分習熟してもらうため、本人が習熟できたと感じるまでトレーニングモードでシステムに慣れてもらう。このモード

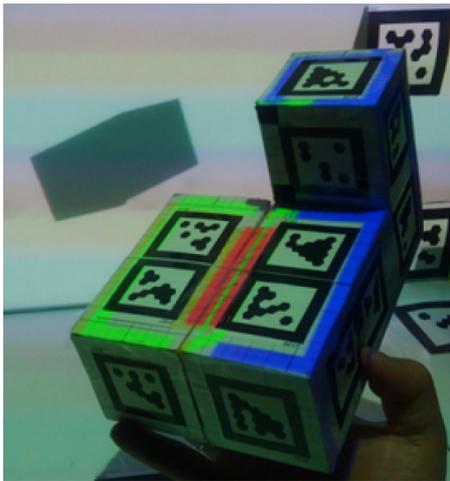


図 12 テープによる固定作業
Fig. 12 Fixing tasks by tapes.

は組立作業とは関係のない作業で、作業パーツの仮想パーツへの重ね合わせを練習することができる。この練習の後被験者は実験タスクへと移る。実験タスクではまず、被験者は横に配置されたテーブルにある2つのパーツを手に取り、作業空間に移動させる。なお、パーツを取る順番は決まっており、被験者は組み立てごとに1つずつ順番に手にとっていく。作業空間にパーツを移動すると、アナモルフォーズにより基準パーツをもとに仮想パーツが3つ提示される。被験者は仮想パーツをもとに作業パーツを動かして、組み立てを行う。2つのパーツが組みあがると、図12に示すようにパーツの枠が強調される。そして、赤い枠で表示されている部分をテープで固定する。テープの固定の後、被験者の横に置かれたキーボードを操作することで次の組み立てに移る。これを繰り返し行うことで、被験者はオブジェクトを完成させる。

本実験では定量評価として、作業全体にかかった時間、組立作業にかかった時間、テープによる固定作業にかかった時間を測定した。作業全体にかかった時間は実験開始からオブジェクトが完成するまでにかかった時間、テープによる固定作業にかかった時間はテープの固定作業に移ってからキーボードを操作するまでにかかった時間である。また、組立作業にかかった時間は作業全体にかかった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時間である。

5.3.2 評価実験：結果と考察

図13、図14、図15に定量評価の結果を示す。全体の作業時間と組立作業にかかった時間とに有意差は見られなかった。また、テープによる固定作業にかかった時間において有意水準1%で有意差が見られた。これより、提案システムの方がテープ貼りやキーボード操作といった細かい作業において優れていることが分かった。この要因として、HMDを用いたシステムでは、解像度の問題から作業物体

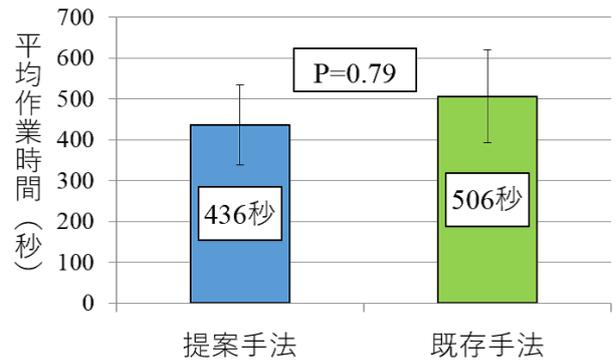


図 13 全体の作業時間
Fig. 13 Whole work time.

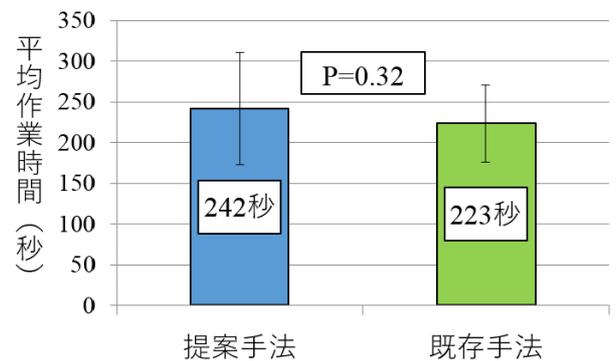


図 14 組立作業にかかった時間
Fig. 14 Time for assembling tasks.

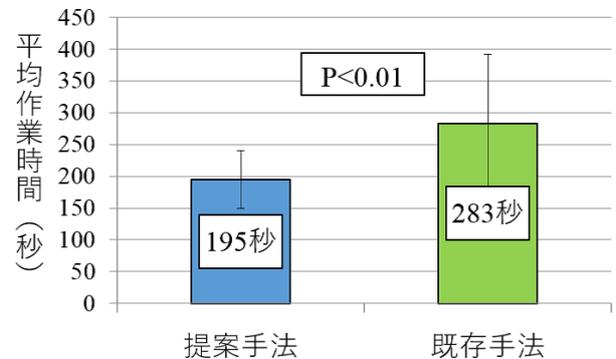


図 15 テープによる固定作業にかかった時間
Fig. 15 Time for fixing time.

を細かく見たり薄い色の認識が難しかったりすることが考えられる。また、HMDを用いたシステムにおいて、被験者がテープやキーボードの操作時に首を頻繁に動かして捜している様子がよく見受けられた。さらに、キーボード操作のミスも多く見受けられた。これらもHMDの解像度や重さが要因になっていると考えられる。以上より、ブロックの組立作業支援において今回使用したHMDと比べると提案システムが特に細かい作業において優れていることが分かった。HMDは頭部に装着し、目前のディスプレイを見るという特性上、その重さから頭部には負担がかかり、解像度や画角は裸眼の状態より劣ってしまう。本実験において差異が見られたのはこのHMDに共通の特性が原因であ

ると考えられる。また、本システムにおける指示はシンプルなものであるため、解像度や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、本実験で用いた HMD より性能の良いもの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。

6. おわりに

本論文ではアナモルフォーズとプロジェクションマッピングを用いた MR 組立作業支援システムを提案した。アナモルフォーズとは特定の角度からある絵を見ると立体視ができるという人間の目の錯覚で、本システムではそれにヘッドトラッキングを導入することで、常時立体視を実現している。そして、組立作業の指示を空間に表示させることで作業支援を実現している。しかし、アナモルフォーズはあくまで錯覚を利用したもので正確な指示が出せないため、作業物体に対するプロジェクションマッピングの指示を行うことでそれを補っている。このように本システムではアナモルフォーズとプロジェクションマッピングを組み合わせることで、裸眼での MR 組立作業支援システムを実現している。

提案システムの有用性を評価するために予備実験と評価実験を行った。予備実験はアナモルフォーズの指示の精度を検証する実験で、システムに習熟した被験者にアナモルフォーズの指示のみをもとに位置合わせを行ってもらった。結果として距離のずれが 50.6 ± 32.9 mm、傾きのずれが 9.7 ± 7.0 mm となった。これより、本システムのアナモルフォーズの指示は組立作業支援における大まかな指示伝達に十分な精度であることが分かった。評価実験は HMD を用いた従来手法との比較実験で、単純な組み立てにテーブルによる固定とキーボード操作を加えたタスクを 18 名の被験者に対し行った。結果として、全体の作業時間と、組み立てにかかった時間に有意差は見られなかったが、テーブルによる固定作業にかかった時間において有意差が見られた。これより、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、他の HMD を利用した場合でも提案システムの有意性が示せると考えられる。以上より、アナモルフォーズとプロジェクションマッピングを用いることで裸眼でありながら有用な MR 組立作業支援システムを実現することができたといえる。

参考文献

- [1] Ochiai, Y., Hoshi, T. and Rekimoto, J.: Pixie dust: graphics generated by levitated and animated objects in computational acoustic-potential field, *Proc. SIGGRAPH'14*, Article No.85 (2014).
- [2] Rakkolainen, I., Diverdi, S., Olwal, A., Candussi, N., Hillerer, T., Landkammer, J., Laitinen, M. and Palovuori, K.: The Interactive FogScreen, *Proc. SIGGRAPH'05*, Article No.8 (2005).
- [3] Tokuda, Y., Noraskin, M.A., Subramanian, S. and Plasencia, D.M.: MistForm: Adaptive Shape Changing Fog Screens, *Proc. CHI'17*, pp.4383-4395 (2017).
- [4] 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).
- [5] Henderson, J.S. and Feiner, K.S.: Augmented reality in the psychomotor phase of a procedural task, *Proc. ISMAR'11*, pp.191-200 (2011).
- [6] Endo, H., Furuya, S. and Okada, K.: MR manual and authoring tool with afterimages, *Proc. AINA'15*, pp.890-895 (2015).
- [7] Tsukada, K., Watanabe, K., Akatsuka, D. and Oki, M.: FabNavi: Support system to assemble physical objects using visual instructions, *10th Fab Lab annual meeting* (2014).
- [8] 橋本菜摘, 椎尾一郎: StudI/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み立て・記録支援, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.12, pp.2577-2588 (2016).
- [9] Kimura, H., Uchiyama, T. and Yoshikawa, H.: Laser produced 3d display in the air, *Proc. SIGGRAPH'06*, Article No.20 (2006).
- [10] Ochiai, Y., Kumagai, K., Hoshi, T., Rekimoto, J., Hasegawa, S. and Hayasaki, Y.: Fairy Lights in Femtoseconds: Aerial and Volumetric Graphics Rendered by Focused Femtosecond Laser Combined with Computational Holographic Fields, *Proc. SIGGRAPH'15*, Article No.72 (2015).
- [11] Alakärppä, I., Jaakkola, E., Colley, A. and Häkkinen, J.: BreathScreen — Design and Evaluation of an Ephemeral UI, *Proc. CHI'17*, pp.4424-4429 (2017).
- [12] Ochiai, Y., Oyama, A. and Toyoshima, K.: A colloidal display: membrane screen that combines transparency, BRDF and 3D volume, *Proc. SIGGRAPH'12*, Article No.2 (2012).
- [13] 奥村光平, 奥 寛雅, 石川正俊: 高速光軸制御を用いた動的物体への投影型拡張現実感, 映像情報メディア学会誌, Vol.67, No.7, pp.J204-J211 (2013).
- [14] Leithinger, D., Follmer, S., Olwal, A. and Ishii, H.: Physical telepresence: shape capture and display for embodied computer-mediated remote collaboration, *Proc. UIST'14*, pp.461-470 (2014).
- [15] 小池英樹, 高橋陽一, 的場やすし: AquaTop Display: 浴室での情報閲覧を目的としたインタラクティブ・サーフェス・システム, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.18, No.4, pp.517-526 (2013).
- [16] 須賀千紘, 椎尾一郎: Anamorphicons: 円筒鏡面を用いたディスプレイの拡張, エンタテインメントコンピューティング 2011 論文集, 07A-06 (2011).
- [17] Araújo, B.R.O., Casiez, G. and Jorge, A.J.: Mockup builder: direct 3D modeling on and above the surface in a continuous interaction space, *Proc. GI'12*, pp.173-180 (2012).



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)。情報処理学会学会誌編集委員、同論文誌編集委員、同マルチメディア通信と分散処理研究会幹事、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、モバイルコンピューティング、ITS等の研究に従事。著書「コンピュータネットワーク」(オーム社)、「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。情報処理学会フェロー、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。