

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

水流添 弘人¹ 重野 寛¹ 岡田 謙一²

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. そうした, MR を用いた組立作業支援において, 最もよく用いられるデバイスが HMD (Head Mounted Display) である. HMD は両手が空く等利点も多いが, 頭部への疲労や解像度の違いによる映像酔いなどの問題点もある. 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, ある平面に描かれた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の 1 種で, ヘッドトラッキングと組み合わせることで常時立体視を実現できる. 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, 正確な位置を伝達出来ないため, 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. 提案システムは, この 2 つの指示を組み合わせることで, HMD を用いない組立作業支援を実現している. 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.

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

HIROTO TSURUZOE¹ HIROSHI SHIGENO¹ KEN-ICHI OKADA²

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ーテインメントから作業支援まで幅広く用いられている. 中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良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上, 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の一種である. これとヘッドトラッキングを組み合わせ, 常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

¹ 慶應義塾大学
Keio University

² 情報通信メディア研究所
Information Communication Media Laboratory

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出来ず、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。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[1]。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[2]。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全て有用であるが、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[3]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[4]、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出来ない。

2.2 プロジェクションマッピングとアナモルフォーズ

以上で上げたように裸眼でMR環境を構築可能な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出来ないものであった。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二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[5]。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[6]。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いるが、あくまで平面の情報しかないため、組立作業支援には応用されることはなかった。

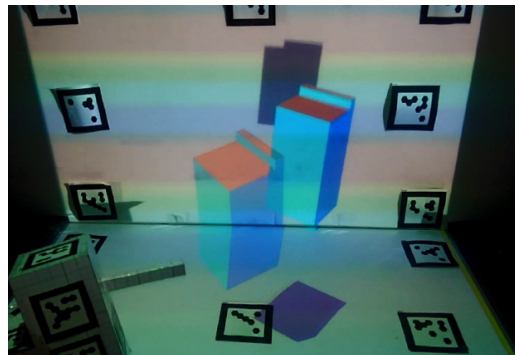


図1 アナモルフォーズによる指示
Fig. 1 Instructions of anamorphosis.

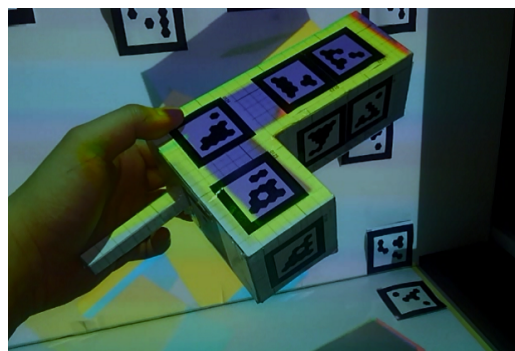


図2 プロジェクションマッピングによる指示
Fig. 2 Instructions of projection mapping.

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えたり立体的に見えたりするものである。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。須賀らは円筒鏡の仲に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[7]。またBruno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[8]。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。

3. 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

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

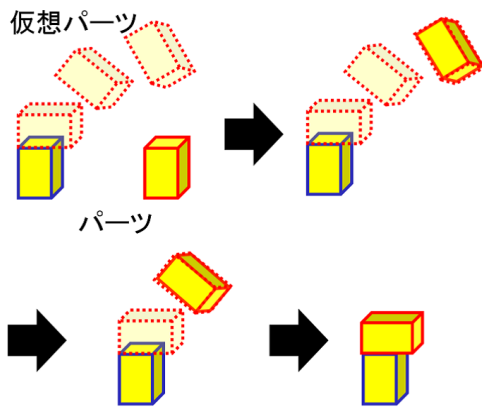


図 3 組立作業の流れ

Fig. 3 Flow of assembling tasks.

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付くと、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。

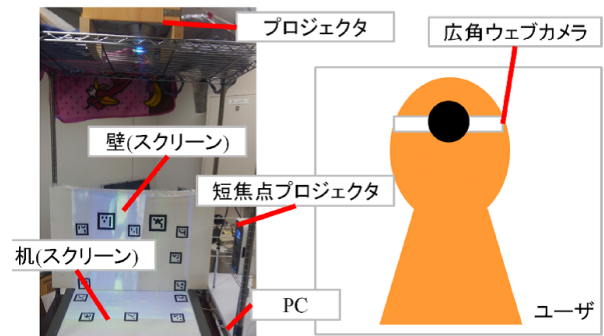


図 4 システム構成

Fig. 4 System structure.

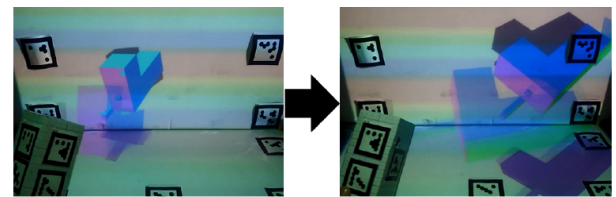


図 5 運動視差効果

Fig. 5 Motion parallax effect.

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、常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動かすとそれを基準にして CG の仮想パーツが生成されている。図左下のパーツの傾きの変化に合わせて生成される仮想パーツの位置姿勢も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作業指示も動くため、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。

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る。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

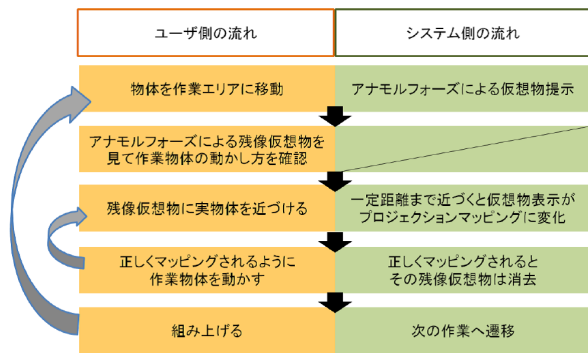


図 6 ユーザの作業とそれに伴うシステムの動作
Fig. 6 User's work and operation of the system.

ツを動かしていく。なおこの際、パーツのマーカが CG で隠れてしまわないように、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伴うシステムの動作を示す。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。なお 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 で出来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全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。

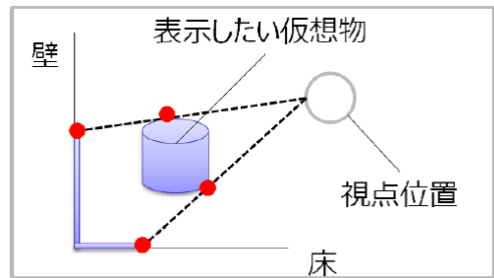


図 7 アナモルフォーズによる指示の生成原理
Fig. 7 Principle of instructions created by anamorphosis.

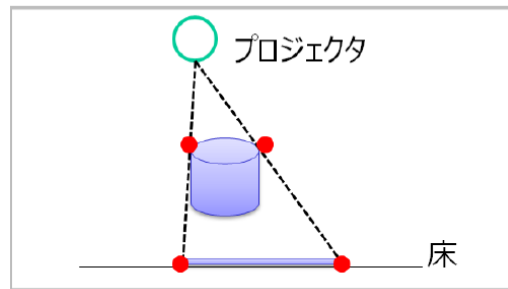


図 8 プロジェクションマッピングによる指示の生成原理
Fig. 8 Principle of instructions created by projection mapping.

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マーカ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 に示す第一座標と第二座標という 2 点を作業パーツ仮想パーツそれぞれに対し設定し、そのずれを計算することにより求めている。第 1 座標は位置姿勢の基準となるマーカの中心に、第二座標は第一座標から x 軸, y 軸方向に同じ値だけ移動させ、30mm 離れた位置に設定した。作業パーツと仮想パーツの 2 つの座標それぞれにおいて距離を計算し、その合計が 60mm 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、

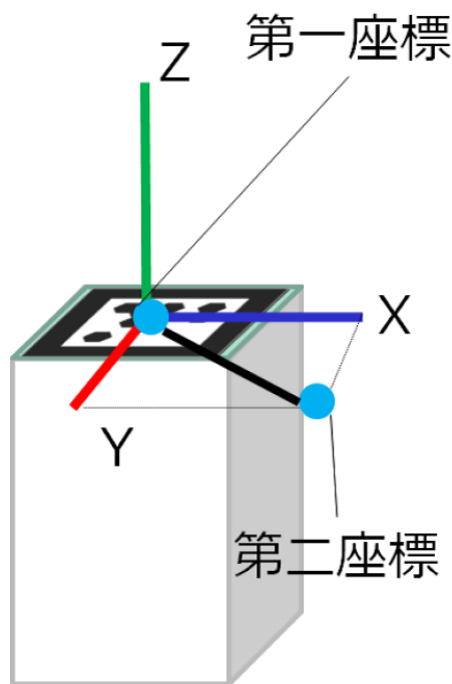


図 9 第一座標と第二座標

Fig. 9 The first and second points.

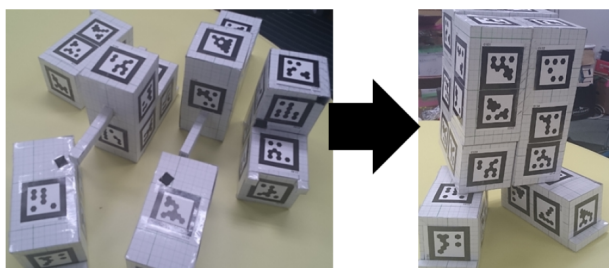


図 10 実験 2 で用いたパーツと組み上げるオブジェクト

Fig. 10 Parts and the object used in the experiment 2.

10mm 以下になると 2 つは重畳されていると判定する。

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。そこで、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 実験内容

本実験のタスクは 6 つの異なるパーツの組み立てである。図 10 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 を用いたシステムを用意した。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



図 11 テープによる固定作業

Fig. 11 Fixing tasks by tapes.

で実験を行った。なお、2 つのシステムでの実験は 1 ヶ月半ほど間を空けているため、作業内容の記憶による実験結果への影響は無視できる。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、本人が習熟出来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、被験者は組み立て毎に 1 つずつ順番に手に取っていく。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元に仮想パーツが 3 つ提示される。被験者は仮想パーツを元に作業パーツを動かし、組み立てを行う。2 つのパーツが組みあがると、図 11 に示すようにパーツのエッジが強調される。そして、赤いエッジ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、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。

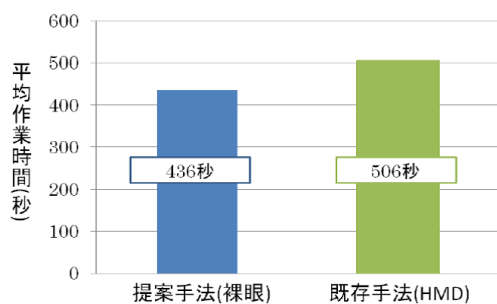


図 12 全体の作業時間

Fig. 12 Whole work time.

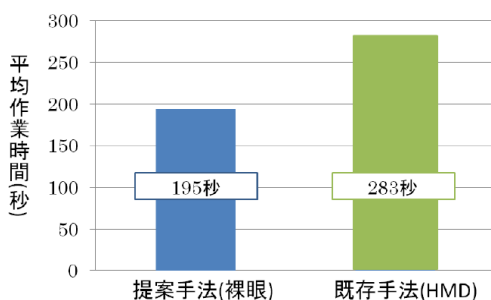


図 13 テープによる固定作業にかかった時間

Fig. 13 Time for fixing time.

5.3 結果と考察

図 12, 図 13 に定量評価の結果を示す。全体の作業時間に有意差は見られなかった。これより、提案システムが少なくとも HMD を用いたシステムと同等の作業効率であり、組立作業支援システムとして十分に機能していることが分かった。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、提案システムが HMD と同等の作業伝達効率であり、特に細かい作業においては今回用いた HMD のシステム以上の効率を実現しているといえる。

6. おわりに

近年、作業物体や作業空間に対して直接指示を重畳できるという点で、MR が組立作業支援によく用いられている。MR 作業支援の中で最も一般的に用いられるデバイスが HMD である。HMD は頭部に装着するディスプレイで

高い臨場感を得ることができるが、視野角や解像度、重みといった問題点もある。HMD 以外の MR 環境を構築する手法として裸眼 3D ディスプレイがあるが、これらは組立作業に応用し難い。

そこで、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実験を行った。HMD を用いた従来手法との比較実験で、単純な組立てにテープ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、テープ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、本システムが HMD を用いた従来手法と同程度の作業効率でありながら、細かい作業や高視野が必要となる作業においてより優れていることがわかった。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出来たといえる。

参考文献

- [1] Henderson, J. S., Feiner, K. S.: *Augmented reality in the psychomotor phase of a procedural task*, In Proc. ISMAR'11 (2011), pp. 191200.
- [2] Endo, H., Furuya, S., Okada, K.: *MR manual and authoring tool with afterimages*, In Proc. AINA'15 (2015), pp. 890895.
- [3] 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).
- [4] 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み立て・記録支援, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 12, p. 2577-2588, 2016.
- [5] 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, p. J204-J211, 2013.
- [6] Leithinger, D., Follmer, S., Olwal, A., Ishii, H.: *Physical telepresence: shape capture and display for embodied computer-mediated remote collaboration*, In Proc. UIST '14 (2014), pp. 461-470.
- [7] 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

ディング 2011, デモセッション発表, セッション 7A 画
07A-06.

- [8] De Araujo, R. B., Casiez, G., Jorge, A. J.: *Mockup builder: direct 3D modeling on and above the surface in a continuous interaction space*, In Proc. GI '12 (2012), pp. 173-180.