仮想物を残像として用いた MR マニュアルとそのオーサリングツール

遠藤裕之[†1]　古矢真之介[†1]　岡田謙一[†2]

作業支援には同期作業支援と非同期作業支援の 2 種類がある．同期作業支援では指示者は作業者の作業中に適切なタイミングでコツを伝達することで効率よく作業を進める．しかし非同期作業支援においては，作業状態の定義付けが困難なため同期作業支援と同等の作業支援を行うことは難しかった．そこで本稿では仮想物を残像として用いた MR マニュアルとそのオーサリングツールを提案する．本提案では作業のコツの付加のタイミングを直感的に指示者（マニュアル作成者）に提示することで作業者へのコツの提示タイミングの選定を同期作業支援と同等に行えるようにする．実験の結果，本提案により既存の MR マニュアルよりも高いこと，および未習熟者でも残像を用いたマニュアルが作成可能であることを確認した．これらのことから本提案で，作業のコツの効率的な伝達を可能にする MR マニュアルとそれをオーサリングするツールを実現したといえる．

1. はじめに

ある作業に習熟していない作業者が作業を進めていく際には指示者の指示が必要となる．その際に指示者が指示を出すことを作業支援と呼ぶ．作業支援は指示者と作業者がリアルタイムにコミュニケーションをとれる同期作業支援[1]と指示者と作業者がリアルタイムにコミュニケーションを取れない非同期作業支援[2]に分けられる．非同期作業支援の最たるものは紙のマニュアルであるが，紙のマニュアルで伝えられる情報には限界がある．さらに作業に必須の情報とそうでない情報の区別がつきにくいなどの問題がある．そこで MR(Mixed Reality) 技術を用いて非同期作業支援を行う研究がなされている[3][4]．MR とは実映像に CG の仮想物を重畳することで，現実世界上に仮想世界の情報を提示する技術のことである[5]．非同期作業支援に MR 技術を取り入れることによって，作業指示を直感的に分かりやすく提示出来る．

従来の MR を用いた非同期作業支援システムでは物体の形状を模した仮想物をアニメーションさせることで作業動作の伝達を行い，アイコンの表示によって意味的な作業指示を行ってきた[6]．これを本稿では以降 MR マニュアルと呼ぶ．しかし同期作業支援と同等に作業指示を伝達することは非常に困難である．この問題の最も大きな要因は作業指示の際に，作業のコツの伝達が適切に行われていないということである．同期作業支援においては指示者がタイミングを見計らってコツを伝達する．しかし非同期作業支援においては作業者の動きに合わせて特定のタイミングでコツを提示することは難しい．MR マニュアルにおいてはコツを表示するタイミングの定義には時間的，労力的にコストが大きいからだ．

†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 慶應義塾大学理工学部情報工学科
Faculty of Science and Technology, Keio University.

そこで本研究では MR マニュアルとそのオーサリングツールにおける残像の利用を提案する．残像とは指示者の作業の軌跡を仮想物で表現したものである．時間的な作業の推移を空間的に表示することで指示者はコツを付加するタイミングを容易に把握する事が出来る．これにより作業者へコツを提示するタイミングの選定を同期作業支援と同様に行えるようにする．

本提案システムにおいては指示者がまず作業を行い，その動きを記録し残像として指示者に提示する．指示者はそれらの残像に作業のコツとしてボイスメモや吹き出しを付加していく．作業者は指示者の残した残像に追随して作業を行う事で作業動作を認識する．さらに残像に付加されているボイスメモやテキストメモにより，作業中に適当なタイミングでコツを提示されることになる．本研究では以上のような手法を実装し，また実験によって残像を用いる事で MR マニュアルの学習効果が高くなること，および残像を利用したマニュアルが作成可能であることを確認した．これらのことから本提案で，コツの効率的な伝達を可能にするマニュアルとそれをオーサリングするツールを実現したといえる．

本稿では，以降第 2 章で MR を用いた作業支援について，第 3 章で残像を用いた MR マニュアルとそのオーサリングツールの提案について述べる．第 4 章で提案を実現するためのシステムについて説明し，第 5 章では提案概念の実用度を検証するために行った評価実験とその結果について述べ，第 6 章で結論を述べる．

2. 関連研究

2.1 MR を用いた作業支援

梶原らは組立作業訓練における MR の効果を実験により考察し，習得率の向上および最長習得時間の短縮を明らかにした[7]．また，鈴木らは遠隔地の作業者に熟練の医師（指示者）が指示を行う遠隔医療指示支援システムを構築した[8]．会話と視覚的な指示を組み合わせることによって指示

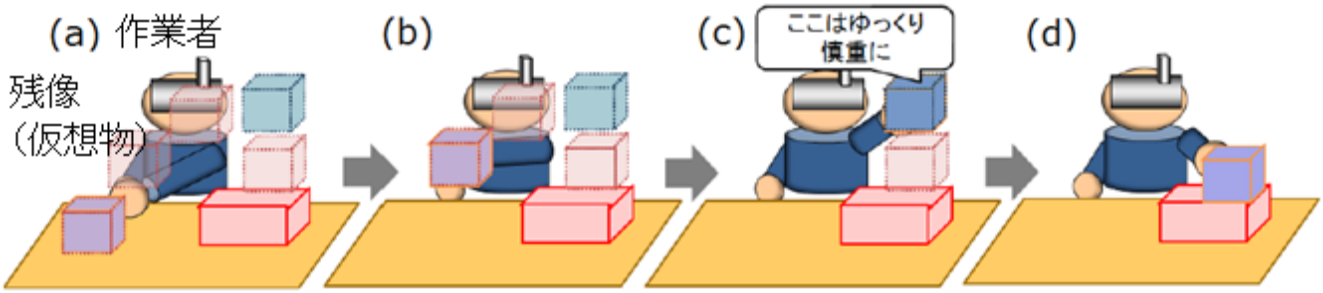


図 1　MR 残像を用いたマニュアルの利用イメージ

Figure 1　The image of MR manual with Afterimage.

者は適切なタイミングでコツを作業者に伝達することが出来る．Steven らは MR によるエンジンの組み立て作業を教示するシステムを構築した[9]. このシステムではアイコンとテキストを用いた指示を行っており，特に作業に従って作業指示が変化することに着目している．この研究により単純に指示を表示するよりも，作業の進捗に応じて指示を表示したほうが優れた効果を発揮することがわかっている．ただし，このシステムではマニュアルのオーサリングについては触れられていない．

2.2　MR マニュアルのオーサリング

MR マニュアルは作業指示を示す仮想物の作成や，その表示タイミングの指定など，指示者に負担が掛かった．一般的に MR 作業指示をオーサリングする場合は PC 上での作業が主であった[10]．しかしこれらはシステムへの知識や技術，労力が必要であった．

そこで Nils らの研究では作業を行っている動画のフレーム間を比較することで作業を細かく分割し，作業指示の表示切替えタイミングとする手法を提案した[11]．これによって指示者は作成のための手間を大きく省くことができた．このシステムでは全自動で大雑把な MR マニュアルが作成可能である．しかし作業に対する注釈の入力な指示者の負担も大きく，実用的なマニュアルを全自動で作成するには問題点が残っている．

また，Zauner らは人が MR マニュアルをオーサリングすることに焦点を当てた研究を行った[12]．このシステムでは組立作業を対象として，マニュアルにおける作業の区切れを各部品が接合されたときとしている．あらかじめ要件を定義づけすることでマニュアルの作成を容易にしているが，それ以外のタスクには対応できないという硬直性の原因にもなっている．

3.　残像を用いた MR マニュアルとオーサリング

3.1　MR を用いた非同期作業支援の問題点

同期作業支援では作業のコツをタイミングよく伝達することで作業効率や学習効果の向上を実現している．作業のコツは作業の体験と深く結びついている．タイミングよくコツを伝達することができれば，作業体験の質を向上させてその効率やマニュアルの学習効果を高めることができるといえる．逆にコツを伝達するタイミングが適切ではない場合，コツに対する実感が薄れてしまい，作業効率や学習効果は低下してしまう．そのためコツを伝えるタイミングは指示者＝マニュアルの作成者が細かく指定できるべきである．

しかし，これまで述べてきたように，MR マニュアルを作成しコツも含む作業指示を表示するためには作業状態の定義が必要となる．これは作業指示を作業の流れに従って逐次的に表示するためである．例えば部品 A と部品 B の距離が一定値以内かつ一定範囲内の相対角度であるといった定義づけをし，さらにそれをセンシングすることで初めてシステムが現在表示すべき作業指示を把握することができる．

このような MR マニュアルで作業のコツを伝達する場合，作業状態の定義が困難であるためコツの伝達タイミングはシステム側の要件に従ってしまう場合が多い．つまり作業の区切り（ある部品を組み立てた直後や作業開始時など）でしか伝達できないということである．効率よくコツを伝達しようとする場合，伝達タイミングは非常に細かく多種多様であるため，従来のような作業状態の定義方法では対応できない．

さらに，作業中の物体の状態から自由に作業状態を定義できたとしても指示者がマニュアルをオーサリングする際にそれらの値を適切に認識できなければコツを付加することは困難である．コツを付加する際，既存の MR マニュアルオーサリングでは部品組み立てを一つの区切りとして，それらの区切りの間でしかタイミングの選定が出来ない．細かいタイミングでの選定が可能な場合もプログラムのソースコードに直接書き込むことでしか設定出来ない．以上のことから，MR マニュアルにおける効率のよいコツの伝達のためには以下の 2 点が必要である．

- 指示者にとって直感的に作業状態を定義できる．
- 物体の状態に合わせて自由にコツを付加出来る．

3.2　残像を用いた MR マニュアル

指示者が直感的に作業状態を定義するには，作業中のある時点における物体の位置姿勢を視覚的に把握する必要がある．そこで本提案では物体の軌跡を表現する残像を採用した．物体の時間的な推移を，残像を用いて表現することで空間的な推移として指示者に提示することが可能となる．

本提案で実装した残像を用いた MR マニュアルの利用イ

メージを図 1 に示す．図 1 (a) にて中空に浮かんだ 4 つの立方体は指示者の動きの軌跡を，物体の残像群として仮想物で表現したものである．作業者は残像に物体を重畳させていくことで作業を完遂させる．作業者が物体と重畳させた残像は順次消えてゆき，現在物体がどういう姿勢であるべきかを直感的に提示する．また指示者の動作の時間的な推移は残像群とその密度によって表現される．指示者がゆっくり注意深く作業を行った箇所では残像群の密度が濃く，素早く作業を行った箇所では密度は薄くなる．これにより作業者は注意すべき箇所を把握することができる．

さらに，特定の残像にはコツが付加されており，図 1 (c) に示すように作業者が該当する残像に物体を重畳したとき作業のコツが提示される．これにより従来の MR マニュアルと同様の作業動作の指示に加え，作業の注意点といったコツを伝達することができる．

我々は過去にも残像を用いた作業指示に関する研究を行っており，残像による向きや動きの伝達には一定の効果が認められてきた[13]．本提案の残像を用いたマニュアルでは既存研究の残像の効果に加え，残像を利用したコツの伝達による，作業効率の向上とマニュアルの学習効果の向上を目指す．コツの表示タイミングを最適化することができれば，これまでの既存研究における非同期作業支援を大きく同期作業支援に近づけることが可能になるのではないかと考えられる．また残像を用いることの副次的な効果として，既存のアイコンのみを用いた MR マニュアルよりも位置姿勢や作業速度などの詳細な作業動作の伝達が可能となる．加えて，既存の仮想物のアニメーションを用いた MR マニュアルよりも一覧性の高いマニュアルとなる．

3.3 残像を用いた MR マニュアルのオーサリング

本提案では残像を用いたマニュアルそのものだけでなく，そのオーサリングも扱っている．作業のコツを自由に作業者に伝達するためには直感的に、作業中の任意の時点での作業状態にコツを付加することが必要である．その方法として，本提案では残像を用いることで作業の時間的な推移を指示者に提示している．図 2 に示すようにある時点での作業状態を示す残像にコツを付加することで，指示者は作業者にコツを提示するタイミングを自由に選定できるようになり，コツを作業者に効率的に伝達することが可能になる．例えばある物体 A を物体 B に組み立てる際，物体を接合には注意が必要な場合，指示者は接合する直前の残像に対しコツを付加すれば良い．

また，効率的に作業指示を行うマニュアルを作成するためには，作業者に提示する情報の追加・削除を直感的に行えるようにするべきである．残像群は一覧生が高いので作業者に提示される残像の直感的な把握が可能であり，作業者に提示する情報の選択も容易である．残像が多く生成され，情報量が過多となり見難くなる場合は不要な残像の削除を行い，逆に残像が少ない場合は必要と思われる残像を追加して，詳しく指示できるようにすることが出来る．作業の空間的な推移が表示されているので作業の難易度に応じた残像の選択が直感的に可能である．

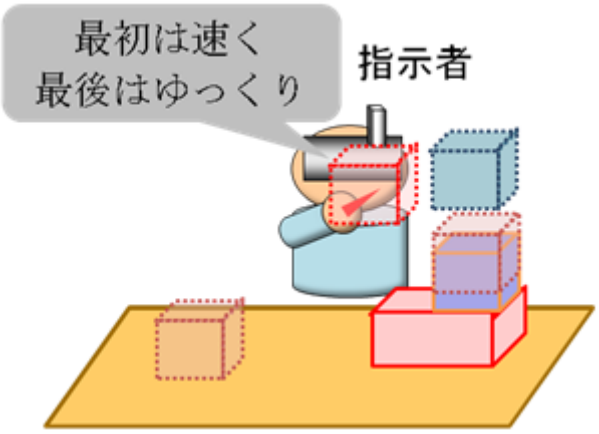


図 2　指示者によるオーサリング

Figure 2　The MR manual with persistence of vision.

4. 実装

4.1 MR を利用した作業空間

本提案システムでは MR 環境を構築する手段として，キヤノン社が開発した MR Platform IV を用いた．また実物体の位置を検出するために MR マーカを，仮想物体を観察するためのデバイスとしてビデオシースルーHMD を用いた．

また本提案システムは残像およびその他の作業指示を仮想物として表示する際に，物体座標系を用いて実装を行った．物体座標系とは物体の 1 つを基準とした座標系であり，基準物体を中心として相対的な位置に仮想物が描画される[14]．本提案システムにおいては一つの物体に対して，別の物体を組み込むといった作業を想定している．そこで前者の物体を被作業物体，後者の物体を作業物体と呼ぶ．本提案システムでは非作業物体を基準物体として扱い，作業物体の動きの軌跡を残像として表現する．被作業物体を中心に，作業物体の残像とボイスメモアイコン，吹き出しアイコン，及び吹き出しを仮想物として表示している．仮想物は被作業物体に追従する形で表示されるので，ユーザは被作業物体を自由に動かして，任意の角度から仮想物を確認することが出来る．

4.2 処理の流れと実装

4.2.1 作業のセンシング

まず指示者は HMD を装着して作業を行う．作業対象となる物体には全てにマーカが添付してあり，HMD のカメラによって認識，処理され，作業中の座標と姿勢が外部ファイルに保存される．作業空間は二つに分けられており，奥側を物体置き場として，手前側を実際に作業する空間として用いている．指示者が奥側にある物体を手前側に持ってくることで，システムは物体を作業対象として認識する．最初に作業空間に持ってきた物体を被作業物体，次に持ってきた物体を作業物体として登録する．被作業物体を青枠で，作業物体を赤枠

で囲むことで，指示者に登録される座標系を認識させる．作業中，被作業物体と作業物体の角度・姿勢ベクトル，および相対座標を外部ファイルに保存しておく．一回の組立が終わり，新たな物体を手前側に持ってきた際，組み上がった物体を被作業物体，新しく持ってきた物体を作業物体とし，作業の進行に合わせて順次，切り替えて記録していく．

また指示者の作業をセンシングする際，作業のコツを伝達するために，指示者の発話を録音している．本提案システムではこれをボイスメモとして用いている．入力は襟元のピンマイクから行い，一定以上の音量（環境音に依存）を検知したら録音を開始し，一定値以下の音量が 2 秒以上続くと録音を終了する．一定以上の音量は，実装環境における環境音を 30 秒計測しその際の最大音量とした．これは意図した発話のみを録音するためである．録音開始時のフレームを記録しておき，そのフレームにおいて保存された残像とボイスメモを紐づけしてその情報を外部ファイルに保存しておくことで，残像を編集する際にボイスメモが付加されるタイミングを指示者に提示する．

4.2.2 残像の生成

指示者の作業データを基にシステムが自動で残像群を生成し，ボイスメモを付加する．全てのフレームでの残像を表示すると残像群は過密になりすぎ，作業指示として支障をきたす．そのため，今回は生成できる残像の中から表示する残像を選別する．まず単純な動作の場合，図 3 に示すように残像の数を極端に少なくしても伝わる場合がある．このような場合を想定して，移動ベクトル，作業物体の角度ベクトルという二つ動作の特徴量を設定しこれら二つの特徴量のいずれかが一定値を超える残像を算出した．システムが自動生成する残像群においては，特徴量が作業物体の大きさに依存する一定値を超えた残像のみを表示し，指示者から特別な操作がある場合のみ，その他の残像を表示することとしている．これにより，残像の密度が一定以上にならないようになり，見易さが向上する．

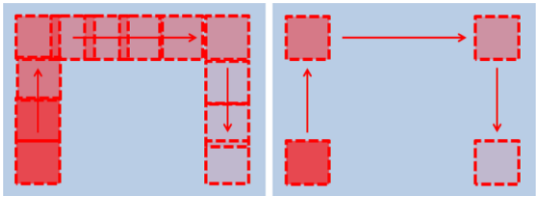


図 3　左：残像過多　右：残像の選別

Figure 3　Left: Excess persistence. Right: Selected persistence.

4.2.3 残像の編集

(1) 残像の選択，解除

残像の選択，解除のための入力方法としてスタイラスとキー入力を採用した．残像が高密度でスタイラスによる選択が難しいとき，キー入力により時系列的に初めの残像，もしくは選択中の残像を基準に順に選択していく．

(2) 残像の追加，削除

残像の数が少なすぎ，動作指示が十分に行われないとき，最も近い残像との中間にある残像を追加する事ができる．逆に残像が多すぎて指示の伝達に支障を来すとき，残像を消去することが出来る．また一定以上の密度で残像を表示させたい場合，物体の一部のみを仮想物として表示する．

(3) ボイスメモの付加，削除

ボイスメモが付加されている残像には図 4 に示すように稲妻形のアイコンが表示される．編集の際には再生して内容を確認し，別の残像に付与，または削除することで，ボイスメモのタイミングをずらしたり削除したりすることできる．

(4) 吹き出しの付加，削除

残像の編集時，キー操作によって残像にテキストメモとして図 5 のように吹き出しを付加することができる．吹き出しが付加されている残像に関しては吹き出し形のアイコンが付加され，指示者は該当する残像を選択することで内容を確認することができる．

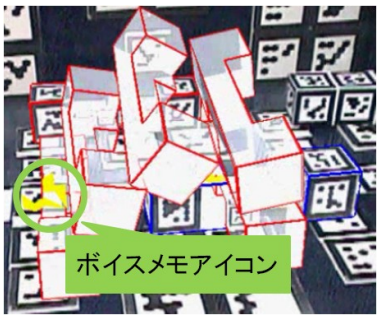


図 4　ボイスメモ

Figure 4　Voice memo.

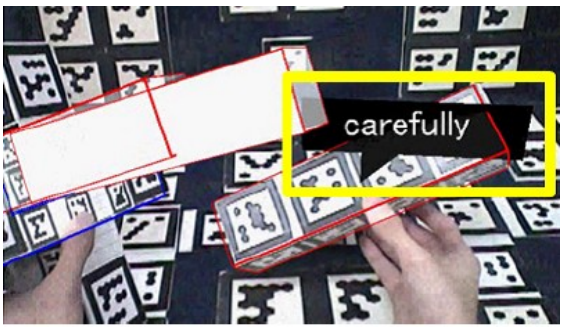


図 5　残像を用いたマニュアルの中の吹き出し

Figure 5　The text memo in the manual.

4.2.4 MR マニュアルの使用

作業者が HMD を装着し残像を用いたマニュアルを起動すると，まず手に取るべき物体（被作業物体）が青くハイライトされる．それを手に取ると，続いて手に取るべき物体が赤くハイライトされる．二つの物体を手に取ることで，図 6 に示すように残像が表示される．表示される残像は，時間的に手前の残像が最も濃く，時間的に後の残像に行くにつれて薄くなる．最も濃い残像に作業物体を重畳すると残像が消え，次に重畳すべき残像が最も濃くなる．この際最も濃い残像以外の残像に作業物体を重畳しても残像は消えないものとし

た．これはたとえ作業者が作業をショートカットしようとしても，必ず一定の手順を踏まないと作業が完了しないようにするためである．ボイスメモや吹き出しが付加された残像に重畳した場合はそれぞれに付加された情報が提示される．あるタスクにおけるすべての残像を消化した場合，最後の残像に 3 秒間重畳し続けることでそのタスクが完了したとみなされ，自動的に次のタスクの残像を表示する．

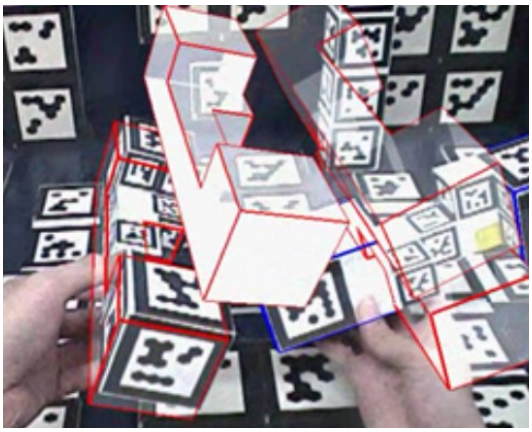


図 6　残像による作業指示

Figure 6　Instruction by Afterimage.

5.　評価実験および考察.

5.1　実験 1: 作業効率と学習効果の確認

5.1.1 実験 1: 実験内容

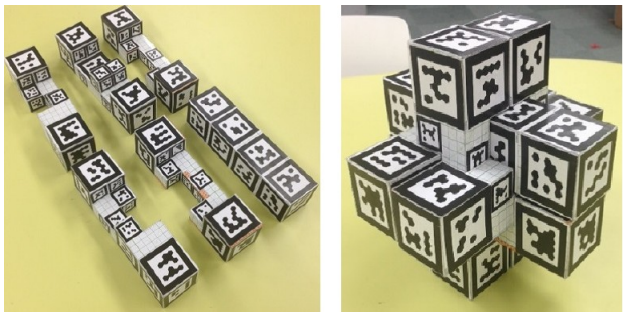


図 7　6 本組み木

Figure 7　6 Burr Puzzle.

実験タスクとして図 7 に示す 6 Burr Puzzle（六本組み木とも呼ばれる）を採用した．6 Burr Puzzle は六本の棒状の部品からなる立体パズルであり，同一，左右対称，類似の部品の部品が存在し，組み方も複雑なため作業の記憶が非常に困難である．6 Burr Puzzle の組方の種類は一種類であり，工程の途中で向きなどを間違うと最後まで組むことはできない．本実験では 6 Burr Puzzle に関して仮想物をアニメーションさせる MR ビデオマニュアルと提案システムの残像を用いたマニュアルの比較実験を行った．被験者は情報系の大学生 20 名である．MR ビデオマニュアルの総指示再生時間は 13 秒であった．まず被験者 20 名を，残像を用いたマニュアルを使用するグループ A(10 人) と MR ビデオマニュアルを使用するグループ B(10 人) に分ける．そしてそれぞれのグループで割り当てられたマニュアルに従い，6 Burr Puzzle を完成させてもらう．マニュアルに従って作業を終えたら，続いて記憶を辿って 6 Burr Puzzle を解いてもらう．このとき基本的にはマニュアルを参照しないが，作業手順が分からなくなってしまったらその都度，割り当てられたマニュアルを参照してよいものとする．マニュアルに従って行った作業においては総組み立て作業時間およびやり直し回数を，記憶に従って行った作業においては総組み立て作業時間およびマニュアル参照回数を計測し，グループ A およびグループ B でこれらを比較した．

5.1.2 実験 1: 結果と考察

(1)マニュアルに従った作業

まず，マニュアルに従った作業を行った際のグループ A（残像を用いたマニュアル）とグループ B（MR ビデオマニュアル）の総作業時間の平均の比較を図 8 に，やり直し回数の平均の比較を図 9 に示す．作業時間の平均に関しては提案と既存では t-検定において有意差は見られなかった（$p < 0.05$）．やり直し回数平均に関しては残像を用いたマニュアルと MR ビデオマニュアルで t-検定で有意差が見られた（$p < 0.05$）．

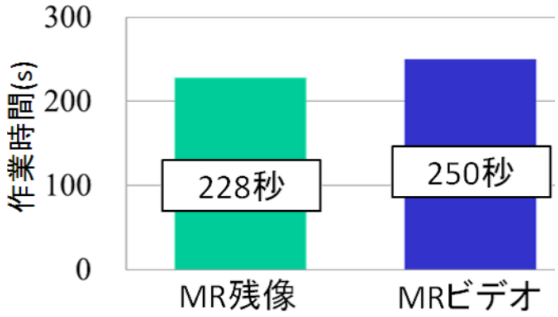


図 8　マニュアルに従った作業における作業時間平均

Figure 8　The average time at following manual.

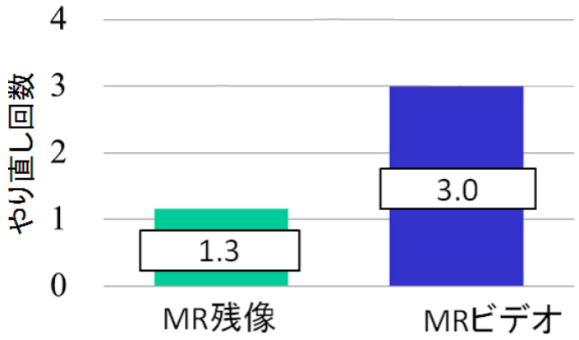


図 9 マニュアルに従った作業におけるやり直し回数平均

Figure 9　The average number of miss at following manual.

作業時間平均の結果から残像を用いたマニュアルによって MR ビデオマニュアルと同等に作業動作の伝達が出来ていることがわかる．作業の本質は MR ビデオマニュアルの動きを追随することと残像を用いたマニュアルを追随することで変わることはないためだと考えられる．単純な平均としては残像を用いたマニュアルの作業時間が短縮している．これは MR ビデオマニュアルの場合一覧性がなく作業指示アニメーションの再生時間が必要なためだと考えられる．

やり直し回数の平均の結果から残像を用いたマニュアルによって MR ビデオマニュアルよりも効率的な作業のコツの伝達ができていることがわかる．MR ビデオマニュアルにおけるタスクの区切れごとのコツの提示の場合，作業に取り組むうちにそのコツに注意を払わなくなることが多い．特に今回実装したような没入型の MR 環境の場合，普段と違う距離感やカメラ画像のわずかな遅れによる違和感から作業者は強く作業に集中する．このような状況の中，たとえ数秒でも複数の事柄を同時に注意して作業を行うことは非常に困難である．

(2)記憶に従った作業

続いて記憶に従った作業を行った際のグループ A（残像を用いたマニュアルを使用）とグループ B（MR ビデオマニュアルを使用）の総作業時間の平均の比較を図 10 に，マニュアル参照回数の平均の比較を図 11 に示す．記憶に従った作業においては，作業時間の平均およびマニュアル参照回数の平均の両方で t-検定において有意差が見られた（$p < 0.05$）．

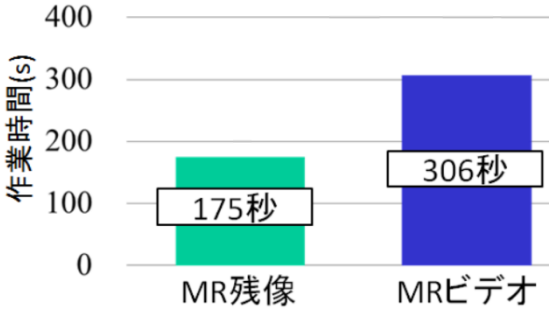


図 10　記憶に従った作業における作業時間平均

Figure 10　The average time at following memory.

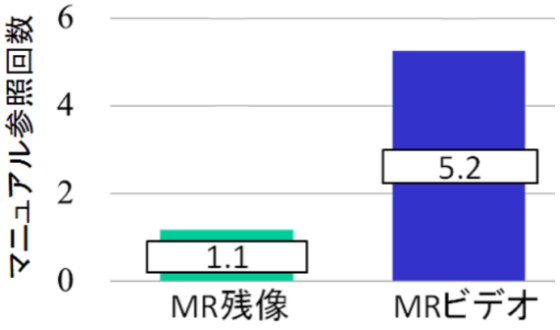


図 11 記憶に従った作業におけるマニュアル参照平均

Figure 11　The average number of miss at following memory.

作業時間の平均およびマニュアル参照回数の平均の結果から，残像を用いたマニュアルによって MR ビデオマニュアルよりも学習効果が高まっていることがわかる．作業時間の平均に関しては，第一に残像を用いたマニュアルが作業を覚えやすくしていることがあり，第二にマニュアルを参照するか否かの判断のスピードが上がっていることが理由としてあげられる．残像を用いたマニュアルおいてボイスメモやテキストメモを用いて伝えられたコツを思い起こすことによって作業者自身が自分のわからないポイントを把握しやすくなっているといえる．

また参照回数が大きく減った理由として，特に今回のタスクにおいて混同しやすい組み方をコツの伝達で注意喚起したことが挙げられる．ビデオマニュアルでは単に組み方を指示するのみであるが，残像を用いたマニュアルはコツを付加するタイミングが豊富である．そのため，持ち上げたときに持ち方を，組む直前に組み方の注意点を，組んだ直後に組み方が間違っていないかの確認方法を提示することができる．各瞬間でどの部分を注意するべきかを提示することで作業手順を強く作業者に印象付けることができるのである．

5.2 実験 2: オーサリングツールの使いやすさの検証

5.2.1 実験 2: 実験内容

実験 2 ではまず被験者に 5 分程度残像を用いたマニュアルの作成方法をレクチャし，10 分間被験者にオーサリングツールを使用してもらった．その後指定した作業の残像を用いたマニュアルを作成してもらい，自分で作ったマニュアルを体験してもらった．出来上がったマニュアルは指示者以外の被験者に使用してもらう．マニュアル化してもらう作業は 6 Burr Puzzle の部品のうち 3 つを使った簡単な作業とした．この作業を完遂するのに有用であると思われる情報は，指定以外の情報でも付加してよいものとした．被験者は 30 名で，二人一組を作り，一人が指示者役としてマニュアルを作成し，もう一人に作業者役としてマニュアルを用いて作業を行った．マニュアル作成に要した時間とマニュアルを使用して作業を行った時の作業時間を計測し，指示者役にはマニュアル作成と成果物に関する 5 段階アンケートを行った．

5.2.2 実験 1: 結果と考察

マニュアル作成に要した時間の平均は 259 秒であった．また，すべての作業者役が作業を完遂でき，その作業時間の平均は約 24 秒であった．指示者役に行ったアンケートの結果を表 1 に示す．アンケートは「強くそう思う」を 5，「強くそう思わない」を 1 とする 5 段階評価で行った．

表 1　マニュアル作成とその成果物に関するアンケート

Table 1　The questionnaire to authoring tool.

質問項目	評価
マニュアル作成が容易にできた	4.4
思い通りのマニュアルができた	4.8

上記の表からオーサリングツールのユーザビリティ面でも高い評価を得たことがわかる．

6. 結論

非同期作業支援のために MR マニュアルがこれまで研究されてきた．しかし，既存の MR マニュアルでは同期支援のような細かい作業のコツの伝達が困難であった．これは MR マニュアルにおいて作業指示を行う際にはそれを行うトリガーとなる作業状態の定義が必要不可欠であり，ちょっとしたコツのような，伝達タイミングが多様な情報を伝える

ための作業状態の定義が困難なためである．

そこで今回，MR マニュアルとそのオーサリングツールにおける残像の利用を提案した．指示者の動きを残像として提示し，時間的推移を空間的推移に変換することで細かい作業状態の定義が可能になる．これにより指示者の思い通りのタイミングで作業のコツを提示できるようになった．指示者は残像の追加や削除，およびそれぞれの残像に吹き出しやボイスメモを用いて作業のコツを付加していくことで，残像を用いた MR マニュアルを作成する．作業者は残像に作業物体を重畳していくことで作業を完了できる．本提案は指示者，作業者共に HMD を使用する没入型 MR 空間で作業を行う．残像は被作業物体を基準とした物体座標で表示され，スタイラスおよびキー入力によって直感的に編集できる．

本提案の効果を検証するために二つの実験を行った．実験 1 の結果から，残像を用いた MR マニュアルは MR ビデオマニュアルと同等に作業動作を指示でき，作業のコツの効率的な伝達が可能であることが分かった．また，残像を用いた MR マニュアルは MR アニメーションマニュアルよりも高い学習効果を有することが分かった．さらに実験 2 の結果と指示者に行ったアンケートから，残像を用いた MR マニュアルのオーサリングツールはシステムの未習熟者にも使用可能であることがわかった．これらの結果より，本提案によりコツの効率的な伝達が可能な MR マニュアルのオーサリングツールを実現したといえる．

謝辞　本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（C）により行われた．

参考文献

1)　Achilleos, A. P, Mettouris. C, Papadopoulos. G . A. et al: Developing an effective social presence system for older adults: The Connected Vitality Network, Proceedings of the ITI 2013 35th International Conference, pp.153 – 159(2013).
2)　小笠原弘樹，柴田 義孝: 分散仮想環境における非同期協調作業支援システム，情報処理学会研究報告マルチメディア通信と分散処理, No. 135, pp. 113-118(2008).
3)　Nawahdah. M, Inoue. T : Helping Physical Task Learning by Automatic Adjustment of a Virtual Teacher’s Rotation Angle, IEEE CSCWD 2011 15th International Conference, pp.710-715(2011).
4)　Fadil. Y, Mega. S, et al: Mixed Reality Cooking Support System Using Content-Free Recipe Selection, IEEE ISM'06, pp.845-850(2006).
5)　田中秀行，大田友一: 複合現実感，映像情報メディア学会誌, Vol.52, No3, pp.266-272(1998).
6)　Motokawa. Y, Saito. H: Support system for guitar playing using augmented reality display, IEEE ISMAR 2006, pp. 243- 244 (2006)
7)　梶原康博，常定和也，西村剛，大崎紘一，池田哲也: 人工現実感を用いた組立作業訓練の効果に関する研究，日本経営工学会論文誌, Vol.59, No.6, pp.162-172(2008).
8)　鈴木雅史，葛岡英明，行岡哲男，遠隔医療指示支援システムの開発，日本バーチャルリアリティ学会 5 回大会論文集, Vol.5, pp.431-434(2000).
9)　Steven J. Henderson, Steven K. Feiner: Augmented Reality in the PsychomotorPhase of a Procedural Task, IEEE ISMAR 2011, pp.191-200(2011).
10)　M. Haringer and H. Regenbrecht: A Pragmatic Approach to Augmented Reality Authoring, IEEE ISMAR 2002, pp.237-245(2002).
11)　Nils Petersen, Didier Stricker: Learning Task Structure from Video Examples for Workflow Tracking and Authoring, Proc. IEEE ISMAR2012, pp.237-246 (2012).
12)　Jurgen Zauner, Alexander Brandl, Werner Hartmann: Authoring of a Mixed Reality Assembly Instructor for Hierarchical Structures, IEEE ISMAR 2003, pp. 23-32(2003).
13)　Yuta Okajima, Shun Yamamoto, Yuichi Bannai, Kenichi Okada: An Instruction Method for Displaying Trajectory of an Object in Remote Collaborative MR on the Basis of Changes in Relative Coordinates, SAINT 2009, pp.43-49(2009).
14)　坂内祐一，玉木秀和，鈴木雄士，重野寛，岡田謙一: 実物体を用いた MR 空間での遠隔協調作業，情報処理学会論文誌, Vol.48, No.7, pp.2465-2476(2007).