

商品物流における 仕分け作業支援への複合現実感技術の応用(3)

—光学シースルー方式を前提とした注釈情報提示法の検討—

山崎 賢人^{*1} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1} 田村 秀行^{*2}

Application of Mixed Reality Technology to Order Picking for Warehouse Storage, Part 3 -A Study of Presenting Annotation Information for Optical See-through HMD-

Kento Yamazaki^{*1}, Fumihisa Shibata^{*1}, Asako Kimura^{*1}, and Hideyuki Tamura^{*2}

あらまし 我々の研究グループでは、商品物流における仕分け作業への複合現実感 (MR) 技術の応用に取り組んできた。本取組みが目指すのは、いきなり仕分け作業を支援する既存の商用システムを置き換えることではなく、MR 化によるシステム設計の自由度向上や作業者が関与する他のシステムへの発展的な展開であり、まずは第 1 ステップとして、作業への情報提示デバイスとして光学シースルー型 HMD を使用した試作システムを開発した。試作システムを評価・分析する過程で様々な問題点が顕在化した。とりわけ、システムが提示する CG の奥行き方向の距離感が掴みにくいため、作業者が目標の商品に隣接する商品を誤って把持するという事象が頻発した。そこで本稿では、この問題を解決するために、光学シースルー型 HMD に適した注釈情報提示法を検討した結果を述べるとともに、システムの改良点についても述べる。

キーワード 複合現実感, 仕分け作業支援システム, 注釈情報, 光学シースルー型 HMD

1. はじめに

現実世界に仮想物体を実時間で重畳描画する複合現実感 (Mixed Reality; MR) は、新たな情報提示技術として注目を集め、実用化に向けて様々な取り組みが行われている。数年前には、自動車産業のデザイン部門や、博覧会・テーマパークのアトラクションにおいて、運用されている事例もあった。しかし、これらは比較的高価な機材を導入可能な分野であり、MR にとって都合のよい制約の下に行われてきた。

最近では、MR に関する社会的な関心も急速に増し、その結果、MR システムで新規事業を目論む企業から様々な実用化課題が寄せられるようになった。我々の研究グループでは、これらの実用化課題の中から作業支援分野、特に仕分け作業に着目し MR 技術を応用したシステムの試作開発に取り組んできた。現在、当該分野に導入されているデジタルピッキングシステム (Digital Picking System; DPS) は完成度が高く、これを MR 技術で置き換えるのは容易ではないが、一方で、MR 技術を導入することによ

てシステム設計の自由度や柔軟性・汎用性等、様々な恩恵が得られることを期待しての挑戦である。

最初のステップとして実際の作業現場で稼働している商用の DPS における作業者の動きを分析し、結果を元に MR 技術によってこれを置き換えるところから着手した。試作システムの第 1 段として表示デバイスに HMD を使用することによって作業者の視界内に作業指示を重畳描画する MR ピッキングシステムを作成した[1]。その後、改良を重ねた上で、商用システムと比較実験を行い、そこで様々な知見を得るとともに、発展の方向性を確認した[2]。

本研究では、文献[2]で顕在化した、作業者が商品をピックアップするとき、ないしは商品容器に投入するときに提示される CG の提示位置が曖昧である、特に奥行き方向に間違いやすいという問題について手法面とシステム構築面から解決策を模索する。具体的には、光学シースルー型 HMD において上述の問題が軽減するような表現方法を検討すると共に、作業ミスにつながるシステム上の問題について改良した点についても述べる。

2. 仕分け作業支援システム

2.1 仕分け作業

商品物流における仕分け作業とは配送センタが有

*1 立命館大学大学院情報理工学研究科

*2 立命館大学総合科学技術研究機構

*1 Graduate School of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

*2 Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University

する一機能であり、作業者が指示に従って、在庫の中から指定された商品を取り出し、指定された箇所に集める作業のことをいう[3]。

配送センタにおいて、仕分け作業の時間は大きな割合を占めると言われており、これを如何に効率化するかが商品物流全体の時間短縮の鍵となっている。そのため、仕分け作業においては作業の効率化のために様々な自動化が図られており、コンピュータ制御されたシステムを用いて作業者に指示を出すDPSが、作業現場では広く浸透している。

2.2 MR ピッキングシステム

本研究では、作業者が商品をひとつずつ取り出し、集品容器に入れる「ピースピッキング」の一形態であり、複数の作業者が同時に、決められた作業範囲で仕分け作業を行う「ゾーンピッキング」を想定してMRピッキングシステムを研究開発している。

提案システムでは、作業者がシースルー型HMDを装着することを前提に、以下の注釈情報を作業者に提示する(図1参照)。

- (1) 仕分け対象の商品や集品容器の3次元位置(以下、強調情報)
- (2) 仕分け対象の商品や集品容器の存在する方向(以下、誘導情報)

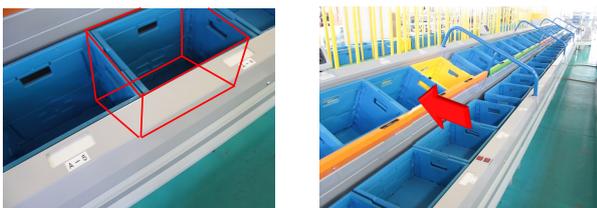
主な機器構成や処理の流れも、文献[2]と同様にサーバ・クライアントモデルを採用し、作業者が商品を「つかむ」「投入する」といった動きをトリガーにクライアントからサーバに商品情報のリクエストを行う。クライアントは、サーバから受信した商品情報を基にMR画像を生成する。

2.3 システムの改良

MRピッキングシステムにおいては、すばやく動く作業者に対して作業者の位置姿勢に適した情報を実時間で提示することが重要となる。そこで、文献[2]で提案したシステムに対して、システム構築面から改良を施した。

【位置姿勢推定】

本システムでは、作業者が装着するHMDの位置姿勢は、HMDに搭載されたカメラ画像からマーカベースの手法によって推定している。しかし、カメ



(a) 対象物の強調 (b) 対象物への誘導
 図1 MR技術による仕分け作業支援システムのイメージ
 Fig.1 Images of MR picking system

ラがマーカを常に認識しつづけることは難しい。そこで、特徴点マッチングによる追跡処理を導入した。具体的には、マーカで位置姿勢を推定し、推定に成功した場合にカメラ画像とマーカの4頂点の座標を保存しておく。その後、マーカによる位置姿勢推定に失敗した場合、直前の位置姿勢推定成功時のカメラ画像と現在のカメラ画像の特徴点を対応付けすることで、現在のマーカの4頂点の位置を推定し、作業者の位置姿勢推定を行う。なお、この対応付けにも失敗した場合は、物理センサで姿勢を推定する。

【HMD キャリブレーション】

文献[5]を参考にカメラ座標系からHMDスクリーン座標系への変換行列を算出した。世界座標系からカメラ座標系への変換行列が推定可能な場合、世界座標系における (X_w, Y_w, Z_w) はHMDスクリーン座標系における (X_s, Y_s) となり、光学シースルー型HMDをかぶっている作業者に意図した情報提示を可能にしている(図2参照)。

これらの改良を行うことによって、CGの提示位置を可能な限り安定・明確にしている。しかし、システム構築面からだけでなく、手法面からもCGの提示を改善していく必要がある。そこで、作業者に提示する注釈情報を工夫することによって、よりわかりやすい情報を作業者に提示することを目指す。

3. 注釈情報提示法

3.1 前提条件

仕分け作業を支援するMRピッキングシステムを設計する上で、情報提示デバイスとしては様々なものが想定されるが、作業現場で使用することを考慮すると、ハンズフリーで作業可能なHMDが第一候補となる。そこで本研究では、光学シースルー型HMDを使用した場合の情報提示を想定する。これは停電等の不測の事態においてビデオシースルー型HMDより安全性が高いこと、文献[1]において光学シースルー型HMDのほうが好印象であったためである。

MR技術によってユーザに意図した情報を提示するためには様々な方法が提案されている。吹上らは、

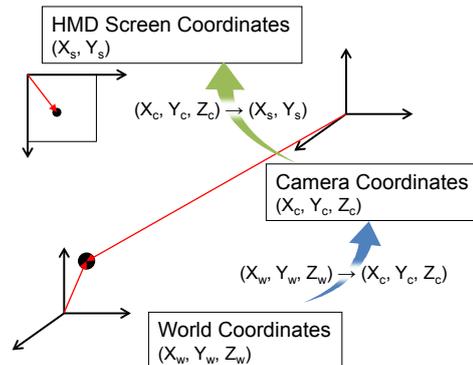


図2 システムが取り扱う座標系
 Fig.2 Coordinate in the system

透明視を利用し遮蔽矛盾を解消する手法を提案している[5]。しかし、光学シースルー型 HMD では計算機上で背景画像に仮想物体を重畳描画しないことから透明視を使用することは難しい。一方、石黒らはユーザの視線によって注釈情報の提示位置を切り替える手法を提案した[6]。また浦谷らは奥行きを考慮した注釈情報提示手法を評価している[7]。

これらの研究で得られた知見をもとに、提案システムでは注釈情報の提示において「色」「位置」「大きさ」「アニメーション」の要素について検討する。

3.2 表現手法の提案

2.2 節で述べたように本システムが作業者に提示するのは、強調情報および誘導情報である。各々の情報の表示方法は、以下の2通りを考える(図3参照)。

- (a) スクリーンオブジェクト: ユーザの前方にある仮想スクリーン上に存在する2次元オブジェクト
- (b) 3次元オブジェクト: 現実世界に重畳描画した3次元の仮想物体

提示する情報と表示方法の組み合わせは4通りあるが、作業者の視野内に仮想物体を重畳描画するHMDにおいて、商品や集品容器の提示にスクリーンオブジェクトを用いることは適切ではない。そこで強調情報は3次元オブジェクトに固定し、誘導情報をスクリーンオブジェクトとするものを提案(A)、3次元オブジェクトとするものを提案(B)とする。

【提案(A)】

図4(a)に示すようにスクリーンオブジェクトに4方向を指す矢印を描画することによって作業者を誘導する。また商品や集品容器を示す強調情報として立方体形状のワイヤフレームを重畳描画した。

【提案(B)】

図4(b)に示すように作業者前方に矢印形状の3次元オブジェクトを提示し、商品や集品容器には3次元オブジェクトを重畳描画している。文献[2]の結果より隣接する商品群や集品容器との間違いが多かったことから、正誤を判断する上での手掛りになるこ

とを期待して段や列によって規則性のある3次元オブジェクトを配置する(図5参照)。

提案(A)、提案(B)ともに、誘導情報は作業者と対象商品群や集品容器との距離や作業者の姿勢に応じてインタラクティブに変化する。そうすることで作業者は強調情報を認識するまでの大まかな距離感を直観的に把握しやすくなる。

4. 評価実験と考察

4.1 目的と実験準備

実験環境として、既存のDPSと同形状の商品棚と集品容器を準備した(図6参照)。文献[2]の実験とは環境が異なるため、[2]で提案した情報提示方法を少数の被験者で試したところ、MR型の仕分け作業支援システムに慣れた被験者であったにもかかわらず、正答率は7割程度にとどまったことから、本システムを使用した場合に、正答率が高くなることを目指す。

評価実験に先立ち予備実験を行った。これは提案した表現方法において「色」「位置」「大きさ」「アニメーション」を決めるためのもので、本研究が想定するシナリオにおいて最も適切なものを選択し、その結果をもとに評価実験を行う。

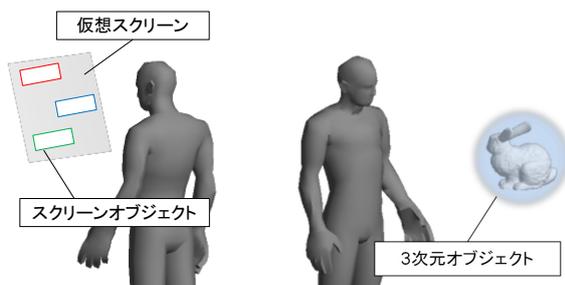
予備実験では、被験者5人(20代男性4名、女性1名)に以下の3項目について複数の表示方法を体験させ、被験者の主観的な意見によって表示方法を決定する。予備実験では提案(A)、デバイスはEPSON製MOVERIO(重量:ヘッドセット240g、コントローラ165g、CPU: Texas Instruments OMAP 4460 Dual-core 1.2GHz、RAM: 1GB)を使用し、スクリーンオブジェクトの矢印を変化させることで評価する。

項目1: 矢印の大きさ

項目2: 矢印の位置とアニメーションの有無

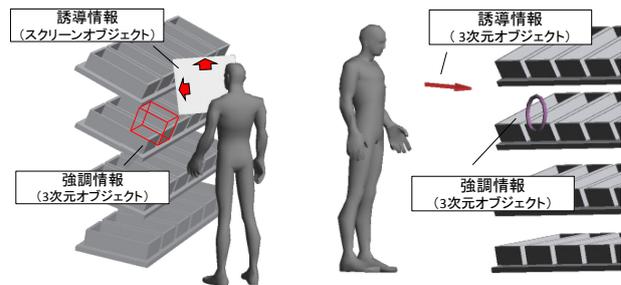
項目3: 矢印の色の組み合わせ

予備実験は項目1から実施し、順に最も好印象である表現方法を選んだ上で、次の予備実験項目にその結果を反映させながら実施した。つまり項目1で



(a) スクリーンオブジェクト (b) 3次元オブジェクト

図3 HMDにおける表現方法
 Fig.3 Annotation Information by HMD



(a) 提案(A) (b) 提案(B)

図4 提案する表現方法
 Fig.4 Proposed expression methods

最も好評価であった矢印の大きさを使用して、項目2を評価した。項目3においては棚が約2mであることから、作業開始時点で被験者と目的の商品群との距離は最大でも2m強である。多くの色を使用すると煩わしいため、事前の検討結果から色の変化は3色とした。最も商品や集品容器に近づいたときには、被験者が強調情報を把握していると推測できることから、矢印の色は「白」とし、他の2色を「赤」「黄」「緑」「青」「紫」から最も好印象であった組み合わせを採用する。

予備実験の結果、矢印の1つの大きさは仮想スクリーン（画角 23°，アスペクト比 16:9）の縦幅に対して約5割，「アニメーションあり」，色の組み合わせは「赤，黄」となった。色については提案(B)の誘導情報にも反映する（図7参照）。

4.2 機器構成と評価実験

本実験においても予備実験で使用した商品棚と集品容器を使用した。作業者に情報提示する光学シースルー型HMDには、Vuzix製STAR1200XL(重量:85g)および予備実験でも使用したMOVERIOを用

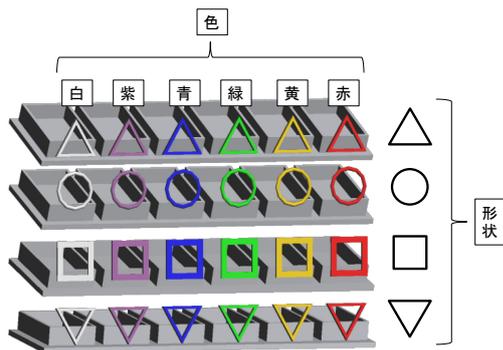


図5 3次元オブジェクトの配置位置案
 Fig.5 Plans for the placement of 3D objects

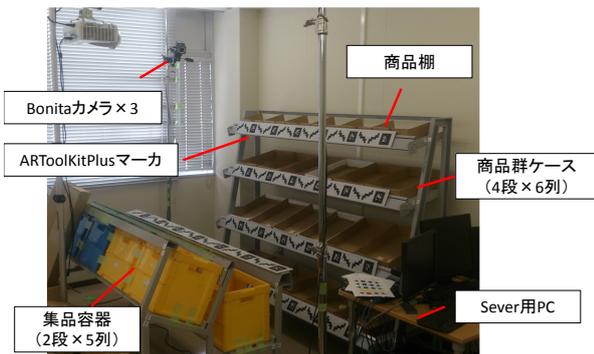


図6 実験環境
 Fig.6 Experiment environment

いている。STAR1200XLはクライアント機としてバックパックで保持したNEC製PC-GL19614GU（重量:875g, CPU: Intel Core i7-3517U, Memory: 4096MB RAM）に接続し使用した。一方、MOVERIOにはAndroid 4.0が搭載されており、クライアント機の機能も有する。インタラクション検出は、STAR1200XLの場合は被験者が手に持ったマウスクリックで行い、MOVERIOではコントローラをタッチすることとした。

作業者の位置姿勢はARToolKitPlus[8]によって推定し、特徴点検出はORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) によって行っている。

被験者の頭部の動きを記録するためにVICON社製のBonitaを用いた[9]。Bonitaは、光学式モーションキャプチャ・システムの廉価版であり、最低3つのカメラで再帰性反射材マーカを認識することで位置姿勢を推定している。本実験では、被験者がかぶるヘルメットに再帰性反射材マーカを貼付し、被験者の頭部の位置と方向を計測・記録した（図8参照）。

4.3 評価実験と考察

本研究では、隣接する商品群や集品容器と間違ってしまう問題を解決する表現方法を提案していることから、本実験においては現実的に最も厳しい条件である全ての段に6つ商品群を配置して実験した。商品棚は4段あることから、商品棚には24種の商品群がケースに入った状態で陳列される。集品容器は2段5列で配置する。実験開始時において被験者の初期位置から最も遠いものを商品棚、集品容器共通して1列目、最も低い位置を1段目とする。

配送センタにおける仕分け作業に、未経験者が事前練習なしに従事することは考えにくいいため、被験者には少し練習を課すことで、未経験者よりは慣れ



(a) 提案(A) (b) 提案(B)

図7 MRピッキングシステムの実装例
 Fig.7 Implementation of MR order picking system



図8 評価実験の様子
 Fig.8 Evaluation experiment

た状態で実験を行う。

本実験での被験者は10人(20代男性7名, 20代女性3名)に対して表1に示す4項目の実験した。

各々の実験における被験者の熟練度のバラツキを可能な限り排除するため, 被験者は4項目をランダム順で行い, ピックアップする商品群や投入する集品容器の位置も予め用意した4パターンをランダムで割り当てている。ただし, 実験3, 実験4は表示される3次元オブジェクトの位置が事前知識としてわかっている必要があることから事前に図5を被験者に見せて説明を行っている。各被験者は実験1項目ごとに20タスクの仕分け作業を行う。

図9に示すように各実験の正答率はほぼ100%であることから(A),(B)どちらの表示方法においても仕分け作業の目標物(商品および集品容器)が正しく認識できるようになったと推測できる。個々の被験者に目を向けてみると10名中3名が全ての実験において100%の正答率となっている。商品を集品容器に投入するアソーティングにおける間違いは, 被験者5が2回間違っただけであった。この2回とも実験4において4列目の集品容器に投入するべき

ところを5列目の集品容器に投入している。実験1, 実験2におけるアソーティング誤りはないことからCGの色や形状に引きずられて間違ったと推測している。提案(B)においては「暗記頼りである」といった意見もあった。

4項目の中で最も正答率が低かったのは被験者7が実験2を実施したときの正答率80%である。被験者7は全て同列の1段違いの商品をつかんでいることから被験者が商品を見下ろしたときに間違っていることがわかった。そこで被験者7が1段目の商品群と間違えて2段目の商品群をピックアップしたとき, 正しくピックアップした被験者の頭部の動きを比較・分析する。

図10(a)は, 被験者7が1段目の商品をピックアップせず2段目の商品をピックアップしたタスクの頭部の位置姿勢である。図10(b)は同様の条件下で

表1 実験内容
Table 1 Content of experiments

表現方法 デバイス	提案(A)	提案(B)
MOVERIO	実験1	実験3
STAR1200XL	実験2	実験4

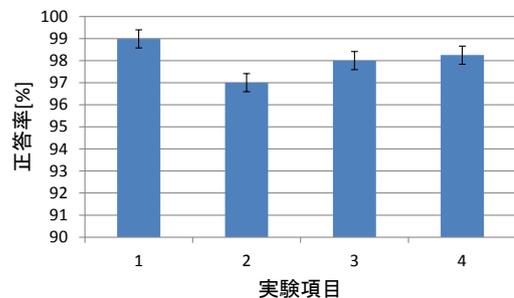
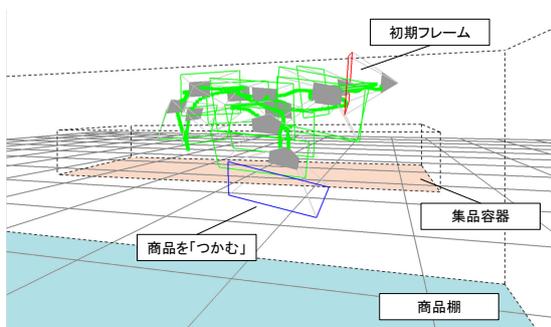
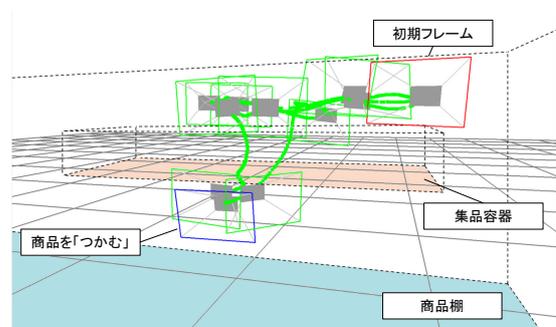


図9 正答率

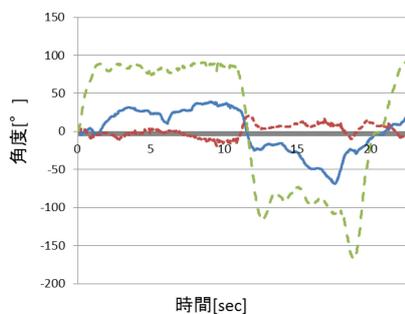
Fig.9 Percentage of correct answers in the experiments



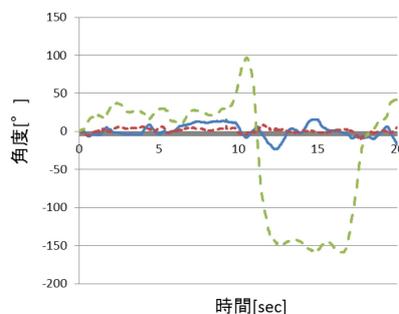
(a) 被験者7の頭部の動き



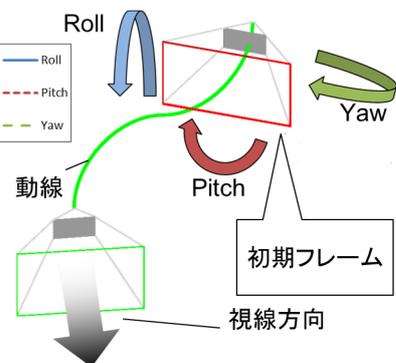
(b) 被験者1の頭部の動き



(c) 被験者7の回転量



(d) 被験者1の回転量



(e) 図の見方

図10 被験者の位置姿勢

Fig.10 Subject's position and orientation

正しくピックアップした全項目において正答率100%の被験者1の頭部位置姿勢である。図中の四角錐は、図10(e)に示すように、被験者の視界を表現している。このタスクの各々の被験者の頭部は図10(c),(d)に1タスク開始時のRoll, Pitch, Yaw全ての値を初期値0として図示した。

図10(a),(b)からわかるように被験者7は上から見下ろすように商品をピックアップしているが、被験者1は姿勢を低くしてから商品をピックアップしていることがわかる。しかし被験者7が実験3、実験4において被験者1のように姿勢を低くしてからピックアップすることで上下の間違いをしていない。よって、提案(B)によってこの種の誤りを回避できたとと言える。

4.4 今後の展望

アンケートの結果、被験者に最も好印象であったものは実験3である。図11は全被験者の1タスクにおける平均時間を示している。モバイルPCで実行しているSTAR1200XLの方が総じて作業時間が短い、MOVERIOによる作業時間との差はあまり大きくなかった。また全ての提案においてMOVERIO版の方が速い被験者もいた。被験者からは、モバイルPCで実行しても処理遅延によってCGが遅れてくるという意見があったためMOVERIOとモバイルPCとの性能差程度では大差はなかった。

また、実験2および4ではバックパックでモバイルPCを保持していることから作業者の動きに制限を課すだけではなく、狭い作業スペースにおいてはバックが周辺と衝突することもあった。これらのことから実験3が最も好印象を得たと推測できる。

また最も正答率の高かった実験1を最も好印象に感じた被験者はおらず、被験者毎に同一実験項目中の誤り傾向は存在することから、作業員毎に提示するCGを変更させるとよい。情報提示方法の変更は既存の商用DPSでは容易ではないことから、MR技

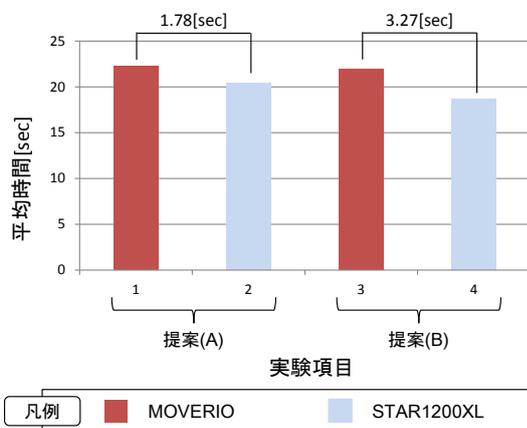


図11 各実験での平均作業時間
Fig.11 Average of execution time on each experiments

術を応用した支援システムの強みである。

本研究において、光学シースルー型HMDを使用したときの表現方法を提案・検討し、有用性は確認したが、如何なる表示方法を提示しても被験者のヒューマンエラーは避けることができない。システム構築面と手法面からロバスト性を高めると同時に、もし誤りがあったときの対策を用意することが重要である。

5. まとめ

本研究では、光学シースルー型HMDでの利用を想定したMR型仕分け作業支援システムにおける情報提示法を考案・検討した。近年、MR技術の知名度が上がるにつれて産業界からその実利用に関する支援が求められるようになってきた。本研究もDPSの製造業からの要請に端を発しているが、MR型の試作システムを実装・運用した結果に基づいて情報提示法を改良し、仕分け作業の正答率を改善することができた。本研究で得られた知見は、仕分け作業のみならず他の全自動化が難しく、人手の作業に頼らざるを得ない分野へと応用可能と考えており、そうした分野で役立つことを期待している。

謝辞

本研究の一部は、オークラ輸送機株式会社からの受託研究による。

参考文献

- [1] 山崎, 柴田, 木村, 田村: 商品物流における仕分け作業支援への複合現実感技術の応用, 第18回日本VR学会大会論文集, 13B-5, pp.196-199, 2013.
- [2] 山崎, 柴田, 木村, 田村: 複合現実感技術を用いた商品物流における仕分け作業支援, 日本VR学会論文誌, Vol.19, No.3, pp.413-422, 2014.
- [3] 鈴木: 配送センターシステム-オーダピッキングのポイント-, 成山堂書店, 1997.
- [4] 加藤, M.Billinghurst, 浅野, 橋: マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション, 日本VR学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.607-616, 1999.
- [5] 吹上, 大石, 池内: 透明視を利用した複合現実感環境下における遮蔽矛盾解消手法の提案, 情報処理学会研究報告. CVIM, Vol.184, No.1, pp.1-8, 2012.
- [6] 石黒, 暦本: Peripheral Vision Annotation: 拡張現実感環境のための視線計測による周辺視野領域情報提示手法, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.4, pp.1328-1337, 2012.
- [7] 浦谷, 町田, 清川, 竹村: 拡張現実環境における奥行きを考慮した注釈提示手法の評価, 日本VR学会論文誌, Vol.10, No.3, pp.343-352, 2005.
- [8] D.Wanger, and D.Schmalstieg: ARToolKitPlus for pose tracking on mobile devices, Proc. 12th Computer Vision Winter Workshop (CVWW 2007), pp.139-146, 2007.
- [9] Vicon[System: <http://www.vicon.com/System/Bonita>