

コンシューマ・システム論文

拡張現実技術を用いた物流ピッキング作業支援システムの開発とHMD表示画角の影響の分析

松本 紀子^{1,2,a)} 小坂 忠義¹ 中島 洋平¹ 櫻田 崇治³ 田野 俊一²

受付日 2020年2月25日, 採録日 2020年6月29日

概要: 物流市場では、荷主企業より物流業務を包括的に受託する 3PL (3rd Party Logistics) 事業と呼ばれる事業形態が拡大してきている。3PL では、コストの 6 割をピッキング作業が占めることもあり、ピッキング作業効率の向上が重要な課題となっている。そこで、直感的な指示提示に有効な AR 技術の活用による効率向上が期待されているが、実用化には至っていない。本研究では、ピッキング作業の効率向上のために、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を使った AR による直感的な指示を行うピッキング作業支援システムを開発し、その効果を検証した。HMD による表示は、実際の視野角に対して表示画角が制限されており、実用化の障壁となっていると考え、VR により複数の HMD 表示画角を再現し、比較分析を行った。その結果、ピッキング作業には 70 度の表示画角が必要であることが分かった。

キーワード: 拡張現実技術, 物流, ピッキング

Development of AR Picking System in Logistics and Analysis of the Effects of HMD Field of View

TOSHIKO MATSUMOTO^{1,2,a)} TADAYOSHI KOSAKA¹ YOHEI NAKAJIMA¹ TAKAHARU SAKURADA³
SHUNICHI TANO²

Received: February 25, 2020, Accepted: June 29, 2020

Abstract: In a logistics market, 3PL (3rd party logistics) businesses that outsource distribution operations from client companies are growing. 3PL companies provide proposals and designs of the distribution system as well as operations and management services for warehouses. The 60% of costs is the picking work; that is, collecting products from each location on a shelf. Therefore, the improvement of picking work efficiency is the most important issue in logistics. For the intuitive instruction and presentation, AR technology is expected, but it does not lead to practical use. In this study, we develop the intuitive picking support system by AR using the head mounted display (HMD), examine the effect. In addition, we think that the field of view (FOV) of HMD is barrier which is narrow than human eye and examine it using VR environment. As a result, we found that the 70 degree of FOV is necessary for the picking work.

Keywords: AR, augmented reality, logistics, pickling

1. はじめに

物流市場では、荷主企業より物流業務を包括的に受託する 3PL (3rd Party Logistics) 事業と呼ばれる事業形態が拡大してきている [1]。荷主企業は、物流業務を委託することにより、物流管理の手間を省き、経営を基盤事業へ注力させることができる。3PL 事業者は、自社で保有している資源を活用し、収益を得ることができる。

¹ 株式会社日立製作所
Hitachi Ltd., Chiyoda, Tokyo 100-8280, Japan

² 株式会社日立物流
Hitachi Transport System, Ltd., Chuo, Tokyo 104-8350, Japan

³ 電気通信大学
The University of Electro-Communication, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

a) toshiko.matsumoto.ad@hitachi.com

3PL 事業者は、物流システムの提案・設計や日々の物流倉庫の管理・運営などを提供する。物流倉庫で管理・運営する作業には、入荷作業、ピッキング作業、検品作業、梱包作業、出荷作業などがある。そのなかで、コストの6割をピッキング作業が占めることもあり [2], ピッキング作業効率の向上が重要な課題となっており、様々な研究が行われている [3], [4], [5].

また、拡張現実技術 (AR: Augmented Reality) は、40年以上前から研究されている技術 [6] であり、スマートデバイスの普及により、市場が拡大している [7]. 特に、AR 技術は直感的な指示や提示に有効 [8] であり、様々な操作指示への活用が期待されている [9], [10], [11], [12].

さらに、AR 活用の実用化 [13] では、病院での薬剤ピッキングでの取り間違い低減や、製造現場での物品管理作業での作業時間 18.2%削減のように効果を具体的に示している。しかし、限定された小空間での実験設定であり、加えて、具体的な実験環境が明らかにされておらず、たとえば、広大な物流倉庫で AR を適用した場合の効果や障壁、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) でのテキスト指示と比べた AR 単体での効果などの現実的なピッキング作業での効果が明らかになっていない。

本研究では、ピッキング作業の効率向上のために、HMD を使った AR による直感的な指示を行うピッキング作業支援システムを開発し、AR 表示の効果を検証する。特に、HMD による表示は、実際の視野角に対して表示画角が制限されており、作業効率に制約があると考え、検証を行う。

2. ピッキング作業の効率化

2.1 ピッキング作業

物流倉庫のイメージが図 1 である。物流倉庫には、商品の在庫を置いている大量の棚が配置される。各棚は、間口と呼ばれる商品の保管場所に区切られる。各間口には、1 つ以上の商品が紐付けられ、各商品の在庫が保管される。各間口には、住所にあたるロケーション番号が割り当てられ、管理される。

従来のピッキング作業は、オーダーに基づいて、商品を各間口から集めてくる作業である。ピッキング作業において、作業者はハンディターミナルを使用する。ハンディターミナルは、作業指示を表示する表示機能と、バーコードをスキャンするバーコードスキャナ機能を有する。作業者は、ハンディターミナルに表示されたロケーション番号、商品名、商品個数などの指示に従って、指示された間口へ移動し、商品を集める。また、収集する際には商品に貼り付けられたバーコードをスキャンする。バーコードをスキャンすると、ピッキング終了と判断され、次のピッキング指示が表示される。作業者はその指示に従って次の商品の間口へと移動する。

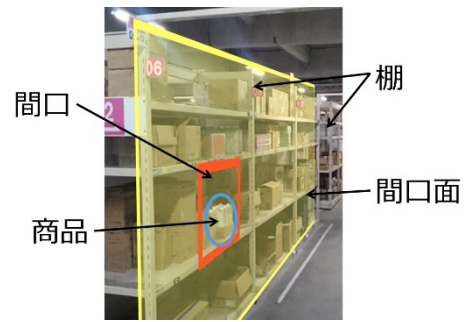


図 1 物流倉庫
Fig. 1 Warehouse.

2.2 先行研究

近年、スマートデバイスの普及により様々な部品コストが下がったことで、ウェアラブルデバイス自体の性能が向上していること、ソフトウェア技術が進歩したことから、カメラ機能を搭載したグラス型の HMD が普及してきている。HMD は、使用中に画面を見ながら両手が使用できる利点がある。このハンズフリーという利点を生かしピッキング作業支援用途への研究が行われている [14], [15], [16], [17].

また、AR 技術により、ピッキング作業指示を行う研究もある。Reif や Funk らは、ピッキング作業位置を指示する Pick-by-Vision システムを構築した [18], [19]. しかし、比較対象は、紙による指示でのピッキング作業である。また、試作システムはトラッキング装置や PC など背負い実用化には至らない。また、山崎らは、ピッキング位置の認識間違いを軽減する表現方法を提案する MR ピッキングシステムを構築した [20], [21]. このなかで、HMD の表示領域や描画遅延の影響を言及している。しかし、デジタルピッキングシステム (DPS) と呼ばれるピッキング方式を比較対象としており、本研究が AR 自体の効果検証するために比較対象としている HMD を用いたテキスト表示の指示によるピッキング方式との差異は明らかとなっていない。

我々は、ピッキング作業効率化の最初のステップとして、HMD を用いて、テキストと矢印でピッキング作業指示を行うシステムを開発し、従来のハンディターミナルを用いたピッキング方式に比べて、作業生産性を 15%向上させることができた [15].

本研究では、HMD を用いたピッキング作業指示を行うシステムに AR を用いてより直感的に作業指示を行い、文献 [15] で提案したテキスト表示と比較し、その効果を検証する。実用化観点での検証のため、市販されている HMD を使用した AR ピッキング検証システムを開発し、検証実験を通して HMD 単体での改善を行い、現状の HMD で最適な AR ピッキングシステムを開発する。そのうえで、評価実験を行い、実用化の障壁を分析した。

HMD の表示画角は作業生産性などに影響があるといわれており [22], ピッキング作業への AR 指示でも障壁となっていると考え、HMD の表示画角について検証を行う。

3. ピッキングシステムの設計

3.1 ARによる作業シナリオ

本研究では、複数の配布先への商品を同時にピッキングするいわゆるマルチピッキングを対象とする。まず、(1) 商品を取り出すピッキング場所をAR表示で指示し、(2) 作業者は、指示されたピッキング場所から商品を取り、回収完了を示すバーコードスキャンを行い、(3) 配布先に応じたカート上の商品の置き場所をAR表示で指示し、作業者は指示された場所に商品を置き、配布完了を示すバーコードスキャンを行い、(4) 次のピッキングへ移る、という作業を、配布先への商品取得がなくなるまで繰り返す。

3.2 ARマーカの選定

AR表示は、現実世界の特定の位置にのみ重畳する必要があるため、カメラにより撮影した画像から表示位置を特定する技術が必要となる。一般的なARのための表示位置の特定技術は、GPSなどの位置情報を用いるロケーション型、特定のパターンを持った図形をマーカ（目印）に用いるマーカ型、物体そのものを認識するマーカレス型に分類される。本研究では、比較的技術として安定しつつあり、ピンポイントな位置の特定が可能である点から、マーカ型の認識技術を用いて位置特定を行うこととした。具体的には、検知距離、角度、検知精度の優れたカメレオンコード [23] を使用した。

3.3 システム構成

システム構成は図2である。AndroidOSを搭載した透過型のカメラ内蔵HMDのうえで、カメレオンコードの認識ライブラリと、今回開発するアプリケーションが動作する。また、作業員からの入力装置として、グローブ型のバーコードスキャナを接続した。

使用するヘッドマウントディスプレイの要件としては、透過型のディスプレイであること、作業員が無理なく装着できる重さと形状であること、とした。

本研究では、透過型のカメラ付きHMDのなかから、両眼型のBT-2000 (EPSON) [24] と片眼型のRM-L191DU (日立 LG データストレージ) [25] を使用することとした。

4. 事前検証システムの開発

4.1 事前検証システム

AR表示による課題を抽出するための検証システムの開発を行った (図3)。

情報を重畳する実空間上の位置を特定するためにマーカとしてカメレオンコードを利用し、棚の作業間口ごとに間口下部にカメレオンコードを設置した。

(1) まず、カメラにより現実空間の映像を取得し、認識エンジン (CC-SDK) によりカメレオンコードの4頂点の座



図2 システム構成

Fig. 2 System configuration.

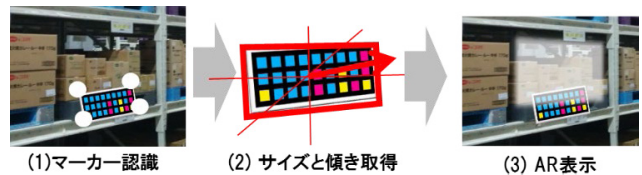


図3 AR描画位置の特定方法

Fig. 3 Get chameleon code position.



図4 AR描画

Fig. 4 AR view.

標を抽出、(2) 取得した座標から大きさと傾きを計算、(3) 取得した座標に対してカメレオンコードのサイズと傾きに合わせて、重畳情報を作成しディスプレイに描画した。

自然なAR表示を実現するため、カメラのプレビュー映像は使用せず、透過型のHMDを使用し、肉眼の視界に対して、情報を重畳した。重畳する情報やレイアウトは、世の中で期待されているARピッキングのイメージを調査し、結果を基に、デザイナーおよび倉庫担当者と議論し決定した。ピッキング棚の位置を示すために間口の大きさに合わせて塗った矩形と、矩形の中央にピッキングする商品の個数を表示した (図4)。

4.2 課題の抽出

倉庫担当者やデザイナーを含めた7名の被験者により、検証システムを倉庫の模擬環境で試してもらい、ヒアリングを実施し、実際の倉庫での作業に適用するにあたり、課題を抽出した。抽出した課題が以下である。

- (1) 情報が表示される対象物を見つけるのに時間がかかる
被験者は、まず、ピッキングの対象を特定するため、どこに情報が重畳されているのか、情報が重畳される認識物を探す必要がある。その際、時間がかかっていた。要因としては下記があげられた。



図 5 表示領域
Fig. 5 Display coverage.

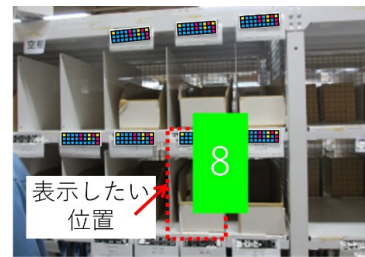


図 7 表示位置のずれの課題
Fig. 7 Problem #3.



図 6 表示の課題
Fig. 6 Problem #2.

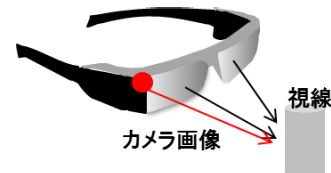


図 8 表示位置のずれの要因
Fig. 8 Reason of problem #3.

A) 重畳表示の遅れ

処理速度の遅さのため、見ている対象に対して、ARによる情報が遅れて表示される。そのため、情報が表示されたときには、すでに視線移動後となり、情報が表示される対象物を特定するのに時間がかかっている。

B) ディスプレイ表示領域の狭さ

今回使用した HMD の情報を表示可能な領域の表示画面角は、BT-2000 が 23 度、RM-L191A で 18 度であり、人間の安定視野 75 度に対して狭い (図 5)。そのため、対象物を表示領域に収めるのに時間がかかる。また、カメラの撮影画面角は約 43 度である。

(2) 不自然な表示

A) 表示が欠ける

重畳される情報は表示領域からはみ出すと、表示が欠けてしまう。透過型の HMD では、被験者は、視界のなかのどこが情報表示可能な領域なのかが分からないため、重畳されている表示がおかしいのか、表示領域の限界のためなのか判断がつかず、不自然だ (図 6) と感じる。

B) 作業位置の視界が見づらい

作業位置に近づきすぎると、重畳した情報がディスプレイを覆ってしまい、視界が見づらい。また、危険である (図 6)。

(3) 重畳される情報の位置ずれ

情報が本来表示してほしい位置とずれて重畳される (図 7)。これは、撮影している映像と実際の視界とのずれによるものであり、被験者の移動がともなわない場合であっても起こる。ずれの要因としては、カメラ位置と目の位置とのずれ (図 8)、個人の装着方法や目の位置の違いによるずれがある。

5. AR ピッキングシステムの開発

5.1 システムの改良

前節で述べた課題について、改善策を検討した。本研究では、実用化を想定し、装置の追加などは行わず、市販の HMD 単体での解決方法を検討し、以降で説明する 3 つの改善策を実施した。

(1) AR 描画処理速度の改善

カメラ画像を取得してから、重畳する情報が表示されるまでに 1 秒程度かかっており、また、1 秒間あたりのフレーム更新数は 2 フレームであったため、重畳表示の遅れ (課題 1-A) が発生していた。重畳表示の遅れを改善するため、①メモリ確保のタイミングをアプリ起動時のみにしたメモリ確保方法の改善、②認識処理と描画処理を並列に行うスレッド分割処理、を行った。その結果、約 0.4 秒の遅延に抑えた。また、描画更新サイクルを 1 秒間に 5 フレームに改善した。

(2) 重畳される情報の位置ずれの改善

カメラ位置と目の位置のずれ、また個人の装着方法や目の位置の違いにより、重畳する表示の位置が本来表示してほしい位置とずれて表示される (課題 (3))。たとえば、人間の視界に対し、カメラの撮影範囲が左側にずれている場合、カメラで撮影した画像上のターゲットに表示枠を作成して HMD 上に重畳表示すると、本来表示したい場所よりも右側にずれて表示される。

そこで、異なる 2 つの距離でのずれの幅をあらかじめ測定し、ずれの幅を補正するためのパラメータを作成するキャリブレーションを実施した。

(3) 表示 UI の改善

課題 1-B ディスプレイ表示領域の狭さ、2-A 表示が欠ける、2-B 作業位置の視界が見づらい、の課題を解決するた

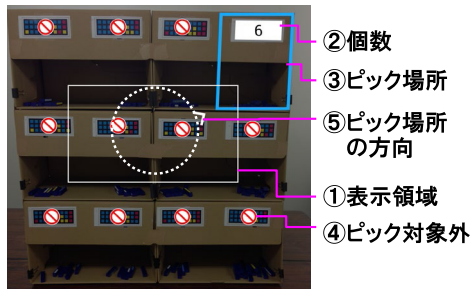


図 9 改善 UI
Fig. 9 Improved UI.



図 10 実験環境
Fig. 10 Experiment.

め、表示 UI の改善を行った (図 9)。

① ディスプレイ表示領域の表示

視界のなかのどこが表示領域なのかが分かりづらく、そのために、狭い表示領域内に認識対象を収めるのに時間がかかったり (課題 1-B)、表示を不自然に感じたりしていた (課題 2-A)。表示領域を明示するため枠を表示することで、認識対象を収めるべき領域を明示し分かりやすくするとともに、重畳する情報の部分的な表示の不自然さを軽減させる。

② ピック個数の表示

検証システムでは、ピック個数を作業棚に重畳した矩形の中央に表示していた。そのため、認識対象 (カメレオンコード) とピックすべき個数指示のどちらかに注目し、狭い表示領域内に収めるべきか混乱してしまい、時間がかかっていた (課題 1-B)。そこで、認識対象 (カメレオンコード) とピック個数指示の表示位置を一致させて重畳することで、狭い表示領域に収めるべき対象を分かりやすくする。

③ ピッキング場所の指示

課題 2-B 作業位置の視界が見づらいという課題を解決するため、ピッキング場所を枠線の表示にする。これにより、作業位置に近づきすぎた際に、作業位置を示す塗りの矩形表示がディスプレイを覆ってしまう問題を解決した。

④ 指定されていない棚に設置したマーカの表示

課題 1-B で、狭い表示領域を使って、作業位置を示すマーカを探すため、作業対象に指定されていない棚位置に設置したマーカには、対象外であることが分かるマークを表示し、作業位置を見つける手がかりとする。

⑤ 作業位置を示す矢印の表示

表示領域の表示画角の 18~23 度に対し、カメラの画角は 43 度と広い (図 5)。課題 1-B で、狭い表示領域を使って、作業位置を示すマーカを探すため、マーカが表示領域内に入っていないがカメラの撮影範囲内に存在する場合には、存在する方向を矢印で表示し、作業位置を見つける手がかりとする。

5.2 システム改良の評価

前節で検討した改善策の効果について、模擬ピッキング

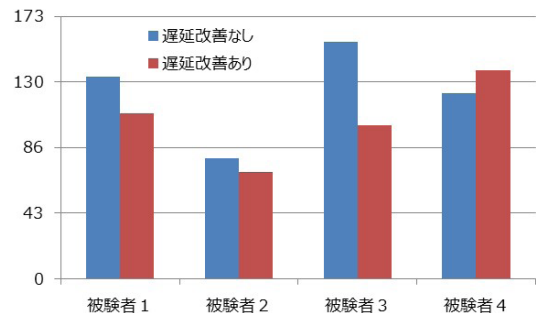


図 11 改善前後のピッキング時間 (秒)
Fig. 11 Picking time (sec).

環境でのピッキング作業により、評価した。その際、眼鏡を使用している被験者は、その上から HMD を装着した。

(1) AR 描画処理速度の改善効果

前節で述べた描画処理速度の改善により、ピッキング作業時間の短縮に効果があったかを評価した。改善前と後それぞれのツールを使って、被験者 4 名 (20 代~30 代の男性 2 名, 女性 2 名) による効果を比較した。被験者は、HMD を通してピッキング対象の間口と取り出す商品の個数を指示され、16 カ所の棚間口の中から指示された間口にある商品 (ブロック) を指示個数分とる、という作業を 5 回繰り返した (図 10)。その際の、所要時間を計測し、比較評価を行った。

その結果、有意差はないが、平均して 13%、作業時間の短縮が認められた (図 11)。

(2) キャリブレーションによる改善効果

前節で述べたキャリブレーションによる改善の効果について検証した。被験者 4 名でキャリブレーション前後での表示のずれ幅を 2 端末 (BT-2000, HLDS 製) で測定した。2m 先に実際に設置した矩形とディスプレイ上に表示した矩形を見比べてもらい、上下左右の辺のずれの大きさを測定した。結果が、図 12 である。どちらの端末においても、開発したキャリブレーションアプリを使用することで、ずれ幅を最大 3cm 以下に抑制し、改善後が有意に小さかった。特に、両眼 (BT-2000) は、人によりカメラと目との位置ずれの違いが大きかったため、大きな効果が得られた。今回開発したキャリブレーションアプリによる位

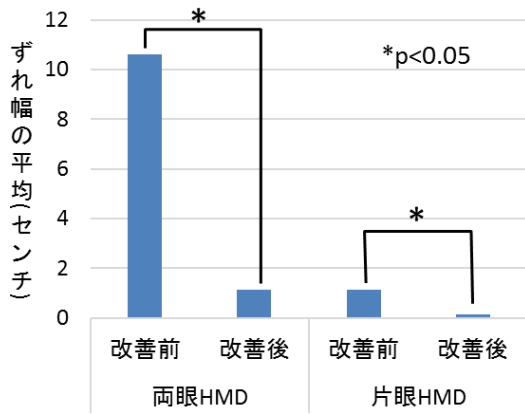


図 12 表示ずれ幅の測定結果
Fig. 12 Effect of calibration.

表 1 評価した UI パターン
Table 1 UI pattern.

#	1	2	3	4
表示例				
表示枠	なし	あり	あり	あり
×印	なし	あり	あり	あり
位置表示	塗り	塗り	枠	枠
個数表示	中央	中央	マーカ上	マーカ上
矢印表示	なし	なし	なし	あり

置合わせ作業には数分かかり、必ず作業前に行う必要がある。たとえば、作業途中で HMD がずれたり、付け直したりした場合、再度位置合わせが必要となるため、作業者の負担の少ないキャリブレーション方式については今後の課題である。

(3) UI による改善効果

前節で述べた UI の改善による効果を検証した。被験者 4 名がピッキング模擬作業を行い、その作業速度の計測、またヒアリングを実施した。課題改善前の UI と、新たに開発した UI を適用した 3 パターンの表示の、計 4 パターン (表 1) でピッキング模擬作業を実施した。

それぞれの UI パターンでの模擬ピッキング作業にかかった時間を図 13 に示す。UI 改善後のパターン 4 の場合が改善前のパターン 1 の場合と比べて、所要時間は平均で 38% となり、有意に速く、有効性が確認できた。また、被験者に対するアンケートでも、全被験者についてパターン 4 が最も作業しやすいと答えた。

6. 評価実験と考察

6.1 評価実験計画

前節で検討した改善策を適用した AR ピッキングシステムを用いて、複数の仕分け先への商品を一度にピッキングするマルチピッキング作業での HMD を用いた AR 表示指

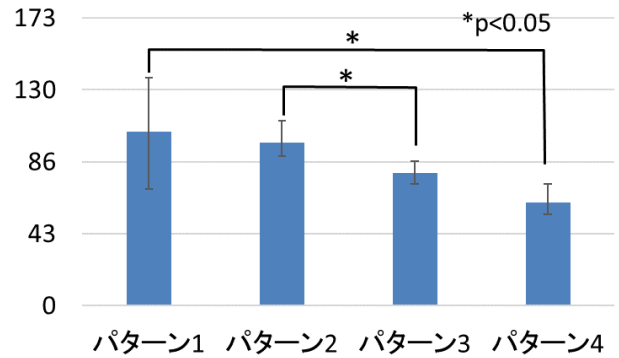


図 13 ピッキング所要時間 (秒)
Fig. 13 Time of picking (sec).



図 14 評価実験環境
Fig. 14 Evaluation experiment.

示における、作業生産性への影響、作業ミスへの影響、疲労度やデバイスの使用感について、評価した。

倉庫内の保管棚のサイズは様々であるが、本実験の模擬ピッキング環境は保管棚のサイズとしては中程度の棚を模した縦 3 段、横 10 列の間口 (35 × 20 cm) の棚と、ピッキング商品としてブロック、そして、ピッキングしたものを収納するピッキングカートを用意した (図 14)。

指示された商品を指示個数分間口から取り出し、ピッキングカートの指示された複数の棚に指示された個数ずつ置くというピッキング作業を実施した。

ピッキング作業の経験のない被験者 2 名 (30 代男性 1 名、女性 1 名/被験者 1, 2) と、実際の倉庫現場で十分にピッキング経験のある倉庫担当者の被験者 2 名 (30 代男性 2 名/被験者 3, 4) で、HMD を用いたテキストによる指示と、AR を用いた指示 (図 15) を行い、それぞれ 15 分ずつ模擬ピッキング作業を実施してもらった。眼鏡を使用している被験者はいなかった。また、HMD は両眼用の BT-2000 と片眼用の RM-L191DU の両方を使用した。実験はビデオで撮影し、ピッキング作業にミスがないかも観察した。

6.2 実験結果と考察

6.2.1 作業生産性

被験者ごとの 1 間口あたりのピッキング作業 (1 つの間口から商品を取り出し、カートに収納するまで) の平均時間を示した結果が図 16 である。両眼、片眼の HMD と



(a) テキストによる指示 (b) ARによる指示

図 15 テキストによる指示と AR による指示

Fig. 15 Text instruction and AR instruction.

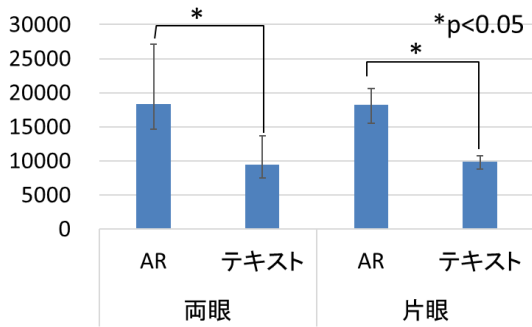


図 16 1 間口あたりのピッキング時間 (msec)

Fig. 16 Result of picking time.



(a) テキスト指示 (b) AR 指示

図 17 テキスト/AR 指示での被験者と棚の距離の違い

Fig. 17 Distance from subject to target (text/AR).

に、AR 指示の場合の作業生産性は、テキストによる指示の場合と比べて 35%~52%、有意に遅くなった。

図 17 に示すように、被験者は、テキストでの指示の場合は、作業位置の近くで指示を確認しているが、AR 指示の場合は、作業位置から離れて指示を確認していた。これは、表示領域の狭さのため、より多くの対象を表示領域内に収めるために、数歩下がって対象を見ているためと考えられる。また、AR 指示の場合は、指示情報を表示させるために、しばらく動作が止まっている様子も見られ、処理速度が依然問題となっていると考えられる。

また、テキスト指示の場合は、動作終了後に次の作業指示がすぐに表示されるため、次の作業開始が並行して行われている様子も見られた。

6.2.2 疲労度

自記式アンケートにより、作業前後の疲労度を調査した。その結果、両眼用では 4 名中 3 名の被験者において、AR を利用した指示のほうが疲労度は高い傾向があった。これは、場所を特定する時間がかかり、ディスプレイを見る時間が長いと考えられる。AR に適した明るさの設定や、

注視時間を減らす検討が必要である。

6.2.3 作業ミス

被験者全体の全ピッキング作業中の作業ミスの比率は、テキスト表示で 0.42%、AR 表示で 0.26% であり、ミスの発生比率は AR 表示の場合のほうが減少した (有意差なし)。ピッキング経験豊富な被験者では、AR 表示でもテキスト表示でもミスはなく、すべてのミスは、ピッキング経験のない被験者で発生しており、初心者の方が AR の効果があると考えられる。

6.2.4 アンケート

アンケートからは、100%の被験者がテキスト指示のほうが作業しやすい・好みであると回答した。被験者からは、処理速度や表示領域の広さに関する問題が多くあげられており、対策が必要である。

また、75%の被験者が両眼の方が良いと回答した。AR 表示の観点からは表示領域の広い両眼が好まれたが、装着感への課題が指摘された。

6.2.5 表示画角

必要な表示画角について検討する。図 17 のように、AR 表示の際には、被験者は、指示表示をディスプレイ領域に入れるため、下がって表示を確認している。この傾向はすべての被験者で見られ、両眼でも片眼でも同様に行われていた。これは画角の狭さのために、画角内の表示エリアに作業領域を収めるための動作であり、本来不要な無駄な動作である。このときに下がった距離と、HMD の表示画角から、ピッキング経験豊富な倉庫担当者が、表示エリアに入れようとしている実際の幅を算出した。ピッキング棚とピッキングカートは大きさが異なっており、下がる距離が異なっていたため、それぞれの必要な表示画角を算出した。その結果、ピッキング棚では、AR を使わない場合の作業位置と同じ場所で作業をした場合で同等のピッキング棚の領域幅をディスプレイ領域に含める場合、表示画角は、片眼で約 63 度、両眼で約 70 度必要となる。ピッキングカートでは、表示画角は、片眼で約 77 度、両眼で約 72 度必要となることが分かった。

6.3 評価実験のまとめ

評価実験の結果、AR を用いた指示による作業生産性は、テキストによる指示の半分程度であった。

また、観察から処理の遅延や表示領域の狭さが依然と課題となっていることが明らかとなった。特に、被験者の動作から、表示画角が足りていない様子が観察され、AR 指示でのピッキング作業時に必要となる表示画角は 70 度と推測された。今回使用した HMD は、表示領域が狭く十分な条件を満たせていないことが示唆された。

そこで、HMD の表示画角の物流ピッキング時の生産性への影響について明らかとするため、検証実験を行い、分析を行った。

7. 表示画角の影響の分析

7.1 表示画角の影響に関する先行研究

HMD の表示位置の影響に関する研究として, Chua らは, デュアルタスク実行中の補助的な情報提示の際に, ディスプレイ位置がパフォーマンスや使い勝手にどのように影響するかを調査している [26]. その際, HMD の表示位置は物理的にディスプレイの位置をずらすことで実現している. しかし, 位置の検証のみで画角の影響の分析までは行っていない. また, Kishishita らは, VR (Virtual reality) 環境において再現された AR 環境において, 視野角の周辺視野への情報提示への影響を分析している [22]. しかし, 主タスクへの情報提示への影響や, 実際に体を動かして作業を行う物流ピッキングへの影響は明らかとなっていない.

本研究では, VR 環境により物流ピッキング作業のテキスト指示および AR 指示を再現し, 複数の HMD 表示画角でピッキング作業を行う実験を行い, 表示画角の影響を明らかにする.

7.2 表示画角の影響の検証方法

本研究で, 検証する表示画角は, 人間の安定視野角 75 度以上を対象とした. しかし, 市販されている AR 向けの透過型 HMD の表示画角は, 最大で 40 度程度であり, 本研究で検証対象としたい表示画角には至らない. そこで, 本研究では, 75 度以上の視野角を再現可能な表示画角の広い不透過型の VR 用 HMD を使用し, VR 環境により倉庫環境を再現した. また, 倉庫環境上に, 複数の AR 表示画角を再現し, 各画角での AR 指示によるピッキング作業を行い, 表示画角の影響を明らかにする.

7.3 表示画角に関する検証実験システムの開発

倉庫のピッキング作業環境を再現した VR 環境で, 複数の表示画角による AR 作業指示を提示する検証実験システムを開発した. 実験では, 6 章の評価実験と同様のマルチピッキング作業を行い, 複数の表示画角における作業生産性への影響, 作業ミスへの影響を評価する.

比較検証を行う表示画角は, 一般的に市販されている AR 向け透過型 HMD 同等の 23 度, 市販されている AR 向け透過型 HMD の最大画角の 40 度, 6 章でピッキングに必要と推測された 70 度, 実験に使用した不透過型 HMD で再現できる最大画角である 110 度とした.

物流倉庫で扱われる商品の保管棚のサイズは様々であるため, 実際に物流倉庫にある一般的な棚のサイズの小さいものから大きいものを網羅するように 1 間口のサイズは, 40 × 45 cm (間口サイズ大), 35 × 20 cm (間口サイズ中), 22 × 15 cm (間口サイズ小) の 3 サイズの間口を VR 環境で再現することとした.

商品を回収するカートは, 4 つの仕分け先用の間口を用

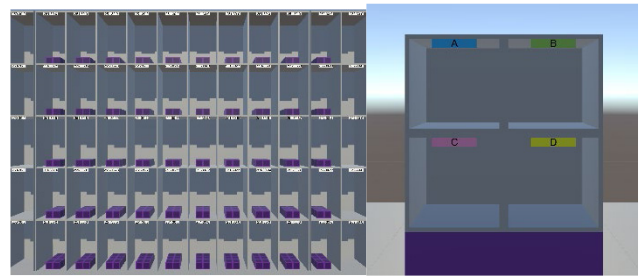


図 18 保管棚 (間口小) とカートの VR イメージ
Fig. 18 VR image of shelf (size S) and cart.

表 2 評価した表示パターン
Table 2 Display pattern.

指示	画角	サイズ
テキスト	23 度	大
	23 度	中
	23 度	小
AR	23 度	大
	23 度	中
	23 度	小
	40 度	大
	40 度	中
	40 度	小
	70 度	大
AR	70 度	大
	70 度	中
	70 度	小
	110 度	大
	110 度	中
	110 度	小

意し, 各間口サイズは 20 × 20 とした (図 18).

作業者に提示するテキストおよび AR 指示の UI は, 評価実験と同じものを使用する. 被験者は, テキスト指示および AR 指示, HMD の表示画角 4 種類と間口サイズ 3 種類の全組合せの 15 パターン (表 2) でピッキング作業を行う (図 19). テキスト指示については, 表示領域の違いは文字の大きさ以外の差異がないため, 23 度のみで実施した.

7.4 検証実験システム

本研究では, VR 環境の提示のために, 視野角 110 度の不透過型の HMD である VIVEPro (HTC corporation) [27] を使用した. VR 環境内での, ピッキング作業時の商品やカートの移動などの操作のために, VIVE コントローラを左右の手に装着した (図 20).

7.5 実験計画と結果

7.5.1 実験計画

前節で開発した検証実験システムを用いて, 評価実験 (6 章) と同様のマルチピッキング作業を行い, AR 指示における作業生産性や作業ミスへの AR 表示画角の影響について, 評価した.

実験では, ピッキング作業未経験, もしくは, 経験の浅い初心者を対象とした. 被験者は, 20 代から 40 代の男性 9 名, 女性 1 名の合計 10 名とした. 眼鏡を使用している被

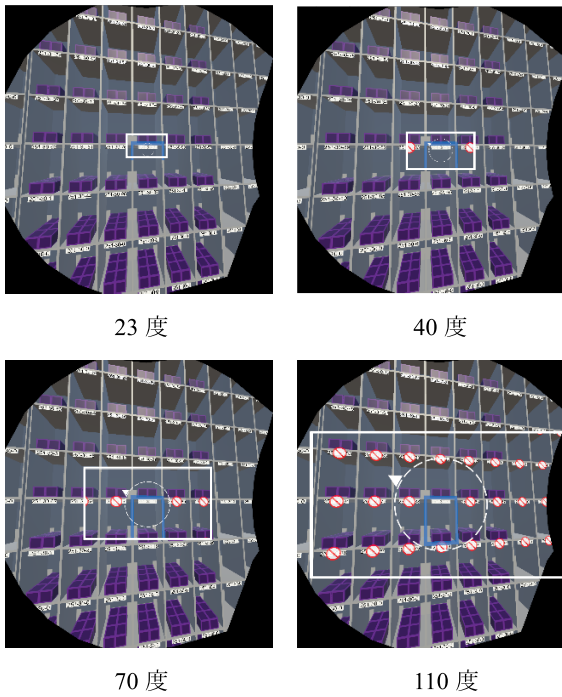


図 19 各画角の AR 表示イメージ (間口サイズ小)
Fig. 19 AR image of each angles (shelf's size S).



図 20 実験設備
Fig. 20 Experimental equipment.

験者は、その上から HMD を装着した。

7.5.2 実験の妥当性について

VR 環境で再現された AR 環境で評価を行うことの妥当性について検証した。

6 章で実施した AR による実験と、VR による再現環境による実験の 1 間口あたりのピッキング平均時間 (msec) を示したものが図 21 である。比較条件は、間口サイズ中、表示画角 23 度とした。

VR 環境で再現された AR 環境で評価することの妥当性について、Lee らは、AR と VR 環境での比較検証を行っている [28]。その結果、システム環境の違いにより絶対値としては差があったが、相対的な優位性については同等の結果となったとされている。

一方で、本実験では、VR 環境と AR 環境では、テキスト指示と AR 指示のピッキング時間の相対的な比較結果に差が出ている。

テキスト指示では、VR 環境の方がピッキング時間が遅くなった。これは、VR 環境では、コントローラでの操作

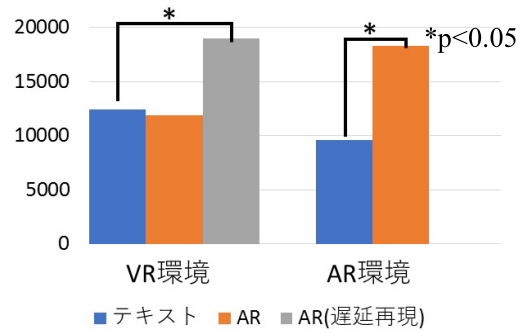


図 21 模擬環境と VR 環境
Fig. 21 Picking time of VR and AR.

となり複数ブロックの同時回収ができない、実際の環境と異なり顔を向けずにカート操作ができない、などの影響と推測される。これについては、AR 指示においても同条件となるため、相対的な比較において問題とならない。

AR 指示では、AR 環境よりも VR 環境の方がピッキング時間が速くなった。これは、AR 環境では、マーカ認識などの処理のための描画遅延があったが、VR 環境では描画遅延を再現しなかったためと推測される。描画遅延については、テキスト指示では問題とならないため、比較結果の差の原因と考えられる。

差異の原因を特定するため、VR 環境での描画遅延を模擬環境と同等に再現して実験を行ったところ、VR 環境と AR 環境におけるテキスト指示と AR 指示の相対的な比較は、どちらもテキスト指示が有意に速く、同等の結果となった。画角の影響を分析するにあたって、今回の実験は、VR 環境は、実際の AR 環境の描画遅延などの影響を排除できている、表示画角の影響のみの比較検証には有効である。

7.5.3 表示画角の作業生産性への影響の分析

テキスト指示および AR 指示での各表示画角に対する 1 回あたりのピッキングにかかった平均時間 (sec) を図 22、図 23、図 24 に示す。

テキスト指示と表示画角 23 度の AR 指示では、すべての間口サイズで有意な差は認められなかった。テキスト表示と表示画角 40 度以上の AR 指示では、すべての間口サイズで AR 指示での作業が有意に速い結果であった。従来のテキスト指示を超える生産性を実現するには、HMD の AR 表示画角は 40 度必要である。

次に、AR 指示における表示画角と作業生産性の関係について分析した。すべての間口サイズのピッキング平均時間 (sec) をグラフにしたものが、図 25 である。グラフから、すべての間口サイズにおいて、表示画角が広がると作業生産性が上がっていることが分かる。すべての間口サイズにおいて、23 度と 40 度間、40 度と 70 度間の作業生産性は、表示画角が広い方が有意に速い結果であり、ピッキング作業には、表示画角 70 度必要であることが明らかとなった。

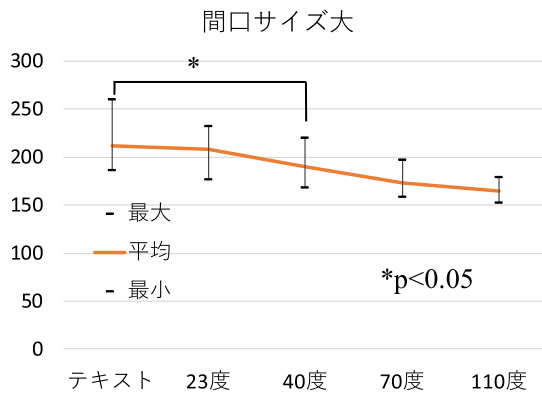


図 22 ピッキング平均時間 (間口サイズ大)
Fig. 22 Average picking time (size L).

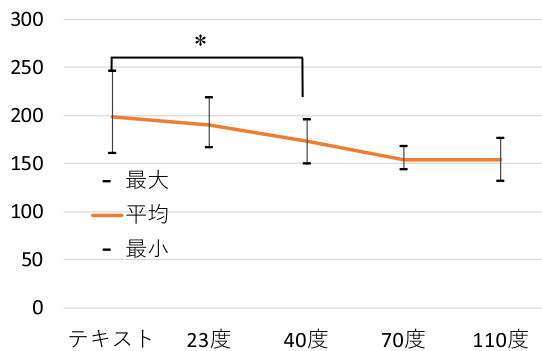


図 23 ピッキング平均時間 (間口サイズ中)
Fig. 23 Average picking time (size M).

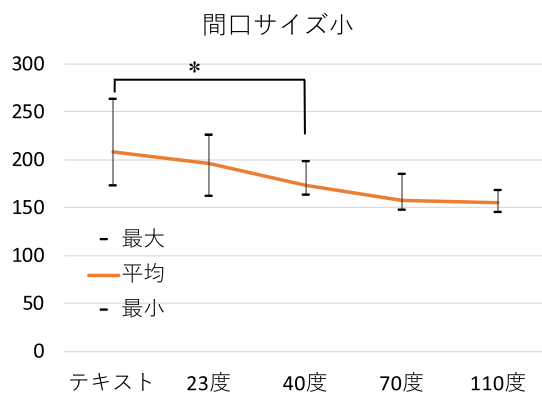


図 24 ピッキング平均時間 (間口サイズ小)
Fig. 24 Average picking time (size S).

間口サイズが異なり作業範囲が異なるため、作業時間の絶対値は異なるが、間口サイズ中と小では、70度で作業時間はほぼ横ばいとなり、作業生産性が収束した。一方、間口サイズ大では、70度と110度間で有意差はなかったもののほかの間口サイズのように作業生産性は収束しておらず、間口サイズが大きく作業範囲が広い場合には、表示画面角110度が望ましいことも示唆された。

ピッキング作業を、指示を受けて保管棚から商品を回収するまでの回収作業と、指示を受けてカートに配置された間口に商品を配布する配布作業に分割した場合の各作業にかかった平均時間 (sec) が図 26 である。

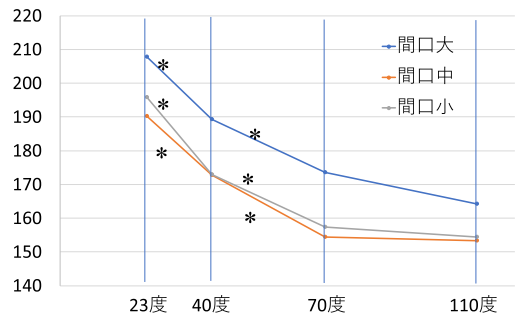


図 25 ピッキング平均時間
Fig. 25 Average picking time.

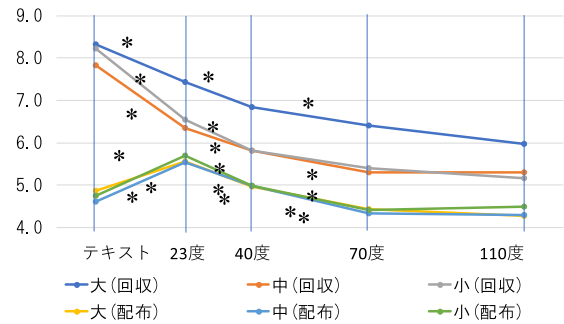


図 26 回収・配布時の作業平均時間
Fig. 26 Average time of picking and putting.

回収作業については、テキスト指示と表示画面角 23 度以上の AR 指示で、すべての間口サイズで AR 指示が有意に速く、AR の効果が認められた。一方、配布作業では、テキスト指示と表示画面角 23 度の AR 指示で、すべての間口サイズでテキスト指示が有意に速く、AR の効果が認められなかった。また、間口サイズ大では、テキスト指示と表示画面角 70 度以上の AR 指示で、AR 指示が有意に速かったが、他の間口サイズでは有意差は認められなかった。

配布作業時は、大量の間口の中から対象の間口を探し出す必要がある。そのため、テキスト指示よりも、直感的な場所の指定が行える AR 指示の作業時間が早かった。一方、配布作業時は、今回の実験では 4 つの配布間口に対してのみ商品を配布するため、4 カ所から対象の間口を探すこととなる。4 カ所程度の場所からの特定については、AR 指示は必要なく、テキスト指示により探した方が速いことが分かった。被験者からも、「テキスト指示は、回収時に配布指示内容も同時に表示されるため、配布作業に素早く移れて効率が良い」、「配布時は、テキスト指示の方が探す時間がかからない」、「配布時は、4 カ所から複数箇所へ配布を行うため指示の全体像が分かるテキスト表示の方が良い」という意見があげられ、配布時のテキスト指示の有効性が明らかとなった。テキスト指示と AR 指示では、位置の特定の難易度に応じて、適材適所で使い分けると効果的である。

AR 指示間の比較では、回収作業については、間口サイズ大および中で、23 度よりも 40 度、40 度よりも 70 度の

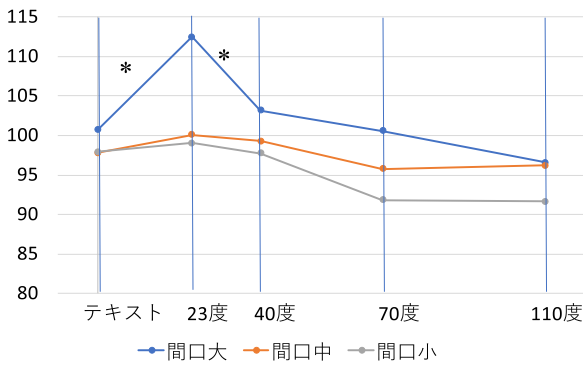


図 27 回収時の棚からの作業位置
Fig. 27 Picking positio.

作業時間が有意に速い結果であった。間口サイズ小については、23度よりも40度が有意に速い結果であった。

また、配布作業については、すべての間口サイズで、23度よりも40度、40度よりも70度の作業時間が有意に速い結果であった。

回収カートを含めたすべての間口サイズのなかで、最も小さい間口サイズである間口サイズ小のみ、40度と70度間での有意差が認められず、間口のサイズが十分に小さいときには必要となる表示画角は狭くなる傾向にあった。

商品の回収作業時の被験者と保管棚の最大距離 (cm) を示したものが図 27 である。表示画角の狭さを補完するために、被験者は、①一目で表示画角内で多くの情報を入手するため間口から離れて表示を確認する、あるいは、②間口からは離れずに顔や目を頻繁に動かし情報を探索して入手すると考えられる。

間口サイズ大のテキスト指示と表示画角 23 度の AR 指示では、テキスト指示の方が有意に棚から近い距離で作業しており、表示画角 23 度の AR 指示では、狭い表示画角のため、被験者は多くの情報を入手するために離れて作業しており、この影響で生産性が下がっていることが分かる。

また AR 指示では、間口サイズ大では、23 度と 40 度で、23 度の方が間口から有意に離れて作業していた。40 度と 70 度では画角間で有意な差はないもののグラフからは作業位置が棚に近づく傾向にあり、40 度では①②の傾向が混在していると考えられる。特に、間口サイズが小さいと、70 度と 110 度で作業位置は横ばいとなってきており、①の傾向がなくなっていることが分かった。

7.5.4 作業ミス

作業ミスの割合 (%) について計測を行った (図 28)。ミスは、配布漏れ、個数違い、場所違いで計測したが、場所違いについては、テキスト指示の方が AR 指示よりも有意に多かった。AR 指示間については有意差は認められなかった。直感的な場所の指示が可能である AR 指示の優位性が明らかとなった。

7.5.5 考察

実験から、AR によるピッキング作業指示において、HMD

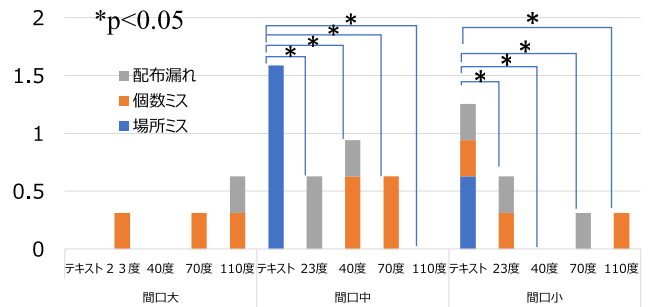


図 28 作業ミスの割合
Fig. 28 Rate of operational errors.

の表示画角は、作業生産性に影響があることが分かった。テキスト指示を上回る作業生産性を実現するためには、HMD の表示画角は 40 度必要である。また、ピッキングの作業生産性を向上させるには、HMD の表示画角は 70 度必要であることも明らかとなった。

また、ピッキング作業時の間口サイズの違いに応じて、必要となる表示画角が異なることが示唆された。間口サイズが 330 cm² と十分に小さい場合には、表示画角は少なくとも 40 度必要である。それ以上の間口サイズでは、画角は少なくとも 70 度必要である。また、有意差は認められないものの間口サイズが 1,800 cm² と大きい場合には、70 度では作業生産性は収束しておらず、110 度必要であると示唆された。

物流倉庫では、複数のサイズのピッキング棚が混在することも一般的であり、物流のピッキングに AR 指示を活用するためには少なくとも 70 度の表示画角が必要である。

また、AR 指示は作業場所の指示に効果的であることも明らかとなった。一方で、場所の特定が容易な作業では、AR ではなくテキストが有効であることも明らかとなり、適材適所での活用が必要である。

8. まとめ

物流分野におけるピッキング作業の作業効率向上のため、HMD を用いて AR で直感的にピッキング作業指示を行うシステムを開発した。模擬ピッキング環境で、HMD でのテキスト指示と比較し、AR の効果を検証した。本研究では、現状の HMD での AR ピッキングの実用化のために、処理速度の改善、表示位置の調整、UI の改善を行い、処理速度の高速化を行った。しかし、AR を用いた指示による作業生産性は、テキストによる指示の半分程度であり、実用化水準を満たす作業生産性の実現には至らなかった。

そのため、現状の HMD によるピッキング作業の障壁の 1 つである表示画角について影響を分析した。そのために、VR により描画遅延などの影響を排除した AR ピッキングの模擬環境を再現し、複数の表示画角でのピッキング作業を行う実験を実施した。

実験から、AR による作業指示のピッキング作業生産性に

は、HMDの表示画角が影響していることが分かった。テキスト指示を上回る作業生産性を実現するためには、HMDの表示画角は40度、ピッキングの作業生産性をさらに向上させるには、70度必要であることが明らかとなった。現状の市販の透過型HMDでは、表示画角70度を満たすものではなく、ハードウェアの進化が望まれる。

現状のHMDによりARを活用するためには、小さな部品のピッキング作業などの、間口サイズが十分に小さく作業領域が狭い作業が対象となる。また、教育や分析などの作業生産性に関与しない作業への活用も有効である。

また、AR指示は作業場所の指示に効果的であることも明らかとなった。一方で、場所の特定が容易な作業では、ARではなくテキストが有効であることも明らかとなり、適材適所での活用が必要である。

今後は、分析などの他の作業支援でのAR活用について検証を進めていく。

謝辞 本研究にご支援、ご協力いただいた皆様に、謹んで感謝の意を表する。

参考文献

- [1] (株)ライノス・パブリケーションズ：月刊ロジスティクス・ビジネス 2015年8月号, p.18 (2015).
- [2] 麻生敏正, 黒川久幸, 上村 聖：スマートフォンを用いた倉庫内作業ブローシステムにおける要素作業推定, 情報処理学会研究報告(DC), Vol.2016-DC-102, No.2, pp.1-6 (2016).
- [3] Kutzelnigg, R.: Optimal allocation of goods in a warehouse: Minimizing the order picking costs under real-life constraints, *3rd IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics*, pp.65-70 (2011).
- [4] 前川佳徳, 齊藤文昭, 吉田淳司：ピッキング作業シミュレーションシステムの開発と作業効率最適化の検討, 情報処理学会全国大会講演論文集第52回(応用), pp.391-392 (1996).
- [5] 金谷勇二, 鈴木 務：物流センターのピッキング作業におけるコンテナ投入順序の最適化, 情報処理学会第51回全国大会講演論文集, pp.343-344 (1995).
- [6] Sutherland, I.E.: A head-mounted three dimensional display, *Proc. AFIPS 68*, pp.757-764 (1968).
- [7] DHL: Augmented Reality in Logistics - DHL, available from (http://www.dhl.com/content/dam/downloads/g0/about_us/logistics_insights/csi_augmented_reality_report_290414.pdf) (accessed 2019-01-21).
- [8] Murauer, N.: An Analysis of Language Impact on Augmented Reality Order Picking Training, *PETRA'18*, pp.351-357 (2018).
- [9] 加島隆博, 宮本 健, 川浦健央, 塚原 整：距離標画像認識によるトンネル内保守点検向け拡張現実, 情報処理学会第79回全国大会講演論文集, Vol.2017, No.1, pp.69-70 (2017).
- [10] 石井裕剛, 中井俊憲, 下 志強, 下田 宏, 泉 正憲, 森下喜嗣：拡張現実感を利用した原子力発電プラントの解体支援手法の提案と評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.2, pp.289-300 (2008).
- [11] 巻潤有哉, 小林達也, 加藤晴久, 柳原広昌：HMDキャリブレーションとオンサイト学習によるハンズフリー遠隔作業支援ARシステム, 情報処理学会研究報告オーディオビジュアル複合情報処理(AVM), Vol.2015-AVM-88, No.2, pp.1-6 (2015).
- [12] 松本紀子, 小坂忠義ほか：作業ロス要因分析のための拡張現実技術を用いた物流倉庫内可視化ツールの開発, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム(CDS), Vol.8, No.2, pp.74-83 (2015).
- [13] 日本電気株式会社：AR ピッキング, 入手先 (https://jpn.nec.com/nec-ar/ar_picking.html) (参照 2019-6-12).
- [14] Ali, S.: SOA based context-aware order picking system for warehouses using Laser Range Finder and wearable computer, *2011 IEEE International Symposium World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoW-MoM)* (2011).
- [15] 藤原貴之, 小坂忠義, 松田孝弘ほか：物流倉庫での仕分け作業におけるウェアラブルデバイス適用方式, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム(CDS), Vol.2015-CDS-14, No.1, pp.1-8 (2015).
- [16] Kim, S.: Influences of augmented reality head-worn display type and user interface design on performance and usability in simulated warehouse order picking, *Applied Ergonomics*, Vol.74, pp.186-193 (2019).
- [17] Guo, A.: A comparison of Order Picking Assisted by Head-Up Display (HUD), Cart-Mounted Display (CMD), Light, and Paper Pick List, *ISWC'14*, pp.71-78 (2014).
- [18] Reif, R. and Günthner, W.: Pick-by-vision: Augmented reality supported order picking, *The Visual Computer*, Vol.25, pp.461-467, Springer (2009).
- [19] Funk, M.: Mobile In-Situ Pick-by-Vision: Order Picking Support using a Projector Helmet, *Proc. 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, Article No.45 (2016).
- [20] 山崎賢人ほか：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, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19, No.3, pp.413-422 (2014).
- [21] 山崎賢人ほか：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, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM), Vol.2015-CVIM-195, No.24, pp.1-6 (2015).
- [22] Kishishita, N.: Analyzing the Effects of a Wide Field of View Augmented Reality Display on Search Performance in Divided Attention Tasks, *2014 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp.177-186 (2014).
- [23] 株式会社シフト：カメレオンコード, 入手先 (<https://www.shift-2005.co.jp/chameleoncode.php>) (参照 2019-01-21).
- [24] セイコーエプソン株式会社：BT-2000, 入手先 (<https://www.epson.jp/products/moveriop/bt2000/>) (参照 2019-01-22).
- [25] 株式会社日立エルジーデータストレージ：LM-191DU, 入手先 (https://hlds.co.jp/product_info/?top=1&sub=3&num=1) (参照 2019-01-22).
- [26] Chua, S.H.: Positioning Glass: Investigating Display Positions of Monocular Optical See-Through Head-Mounted Display, *ChineseCHI2016: Proc. 4th International Symposium*, Article No.1, pp.1-6 (2016).
- [27] VIVEPro: HTC Corporation, available from (<https://www.vive.com/jp/product/vive-pro/>) (accessed 2020-01-28).
- [28] Lee, C.: A Replication Study Testing the Validity of AR Simulation in VR for Controlled Experiments, *2009 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp.203-209 (2009).



松本 紀子

2002年電気通信大学大学院情報システム学研究科修士課程終了。同年(株)日立製作所入社。組み込みシステム、物流システム等の研究開発に従事。現在、社会人学生として電気通信大学情報理工学研究科博士後期課程に在

学中。



小坂 忠義

1993年名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年富士通研究所入社。2007年(株)日立製作所入社。エネルギー分野、物流分野のソフトウェアプラットフォームに関する研究に従事。東京大学新領域創成科学研究

科博士課程単位取得退学。電気学会会員。



中島 洋平

2005年千葉大学工学部デザイン工学科卒業。音響機器メーカーでのカーナビゲーション、オーディオ機器のUIデザインの経験を経て、2014年(株)日立製作所(研究当時在籍)に入社。業務系アプリケーションのUIデザイン

に従事。



櫻田 崇治

2001年東北大学大学院情報科学研究科修士課程修了。同年(株)日立物流入社。同年3PLの物流センター構築業務、2013年よりデジタル技術や自動化技術を活用した物流業務の高度化や新規事業開発に従事。



田野 俊一

1983年東京工業大学院総合理工学研究科システム科学専攻修士課程修了。博士(工学)。同年(株)日立製作所システム開発研究所入社。1990~1991年カーネギーメロン大学客員研究員。1991~1995年国際ファジィ工学研究

所。1996年電気通信大学大学院情報システム学研究科助教授。2000~2001年マサチューセッツ工科大学客員科学者。2002年電気通信大学教授。2020年電気通信大学学長。人工知能、あいまい理論、認知モデル、知的HCIの研究に従事。