

# 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

山崎 賢人<sup>\*1</sup> 柴田 史久<sup>\*1</sup> 木村 朝子<sup>\*1</sup> 田村 秀行<sup>\*2</sup>

## An Order Picking System for Warehouse Based on Mixed Reality Technology

Kento Yamazaki<sup>\*1</sup>, Fumihisa Shibata<sup>\*1</sup>, Asako Kimura<sup>\*1</sup>, and Hideyuki Tamura<sup>\*2</sup>

Abstract --- This paper describes prototyping of a mixed reality (MR) order picking system which is used for a warehouse. Recently, MR, a technology that superimposes computer generated images (CGI) onto the real world in real-time, is used in various fields. MR technology has a variety of practical uses including assistance in machine maintenance and repair, parts assembly for industrial products, and so on. Especially, giving instructions to a worker using MR technology is used for wide range of applications. In this study, we try to make an MR based order picking system as one of the practical applications of MR technology. First, we analyze a conventional order picking system which employs colored lights mounted on racks for indicating picking items. Then, we design a prototype MR order picking system based on the result of the analysis. In our system, it is possible to provide intuitive information to the worker by displaying CGI such as an arrow through an HMD. We conducted experiments using both the conventional system and MR system to make a comparison of them and found some challenges for the future.

Keywords: mixed reality, order picking system, 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拡張現実感 (Augmented Reality; AR) や複合現実感 (Mixed Reality; MR) は、新しい情報提示技術として注目を集め、広汎な研究開発が行われている。その実用化に関して、既に10年以上前の我が国の「MR研究プロジェクト」[1]では教育・娯楽、建築・都市計画への応用、ドイツの「ARVIKAプロジェクト」[2]では製造業での組立・保守などへの応用が試みられていた。その後5年以内に、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では、完全に日常的な運用が可能な実用レベルに達していた。ただし、これらは比較的高価な機材導入が可能な分野であり、かつ体験空間やコンテンツ制作でAR/MR技術に好都合な制約を課しやすい環境での実用化であると言える。

さらにその後2008年頃から、「ARブーム」とも言える現象が起き、AR/MR技術に関する社会的関心が急速に増し、研究開発も活発化する[3]。AR/MRシステムで新規事業を目論む企業も増え、様々な実用化課題が寄せられるようになった。残念ながら、

その中には現状技術と求められるコストでは実現できないものが少なくない。多くの先端技術がそうであるように、ハイエンドの注目を集める応用は実現できても、地味な日常的な課題を低コストで安定して解決することの方が難しい。AR/MR技術もまたそのような状態に留まっている。

この状況を打破するには、産業現場から寄せられた実務的な課題に対して、実際に試作システムを開発・運用して、問題点を分析し、手法面とシステム構築面の両方から解決策を模索することが肝要である。学術的には大きな進歩はなくても、実務的な課題の解決法には共通するものがあり、AR/MR技術の実用水準を高めることに繋がると考えられる。

上記のような考えに基づき、長年、MR研究を多角的に研究している筆者らのグループが、産業界から寄せられる多数の課題の中から選んだのは、商品物流における仕分け作業へのAR/MR技術の応用である。後述するように、既存の商用システムの完成度は高く、これをAR/MR技術で置き換えるのは容易ではない。その半面、AR/MR技術の導入により、システム設計に自由度は増し、作業員が関与する他のシステムへの発展的展開も期待できる。

本論文では、HMDを用いたMR仕分け作業支援システムの設計と試作を通じて得られた知見について報告する。以降、2章で既存の仕分け作業支援システムの分析と、それに関連する研究を概観する。

\*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

3 章では、MR 仕分け作業支援システムの設計方針やシステム・アーキテクチャなどについて述べる。4 章では既存の仕分け作業支援システムと比較実験を行い、その結果について考察する。5 章においてまとめと今後の展望を述べる。

## 2. 仕分け作業支援システム

### 2.1 オーダピッキング

商品物流における配送センタは入荷・保管・仕分け、検品・包装・出荷の機能を有している。仕分け作業は、作業者が何らかの指示に従って、在庫の中から指定された商品を選び出し、一箇所に集める作業で、迅速さと正確さが求められている。厳密には、選出す作業を「ピッキング」、仕分ける作業を「アソーティング」と呼ぶ。ピッキングのみで仕分け作業（オーダピッキング）とすることもあるが、国内では、上記 2 つの動作をまとめてオーダピッキングと称することが多い。

オーダピッキングは扱う商品のまとめ方で、商品単位で扱う「ピースピッキング」、複数の商品が入った箱単位で扱う「ケースピッキング」、複数のケースが乗ったパレット単位で扱う「パレットピッキング」の 3 種類に分けることができる。また上記と異なる観点から、作業者が決められた担当区域でのみ仕分け作業を行う「ゾーンピッキング」や、先に複数顧客分の商品を収集してから後からまとめて仕分けを行う「バッチピッキング」などが存在する。商品物流におけるオーダピッキングでは、これらを組み合わせることによって作業環境に応じた仕分け作業を設定している[4]。

配送センタにおける仕分け作業は全体の 60%以上の時間を占めると言われ、仕分け作業を如何に効率化するか時間が短縮のひとつの鍵となっている。

作業を効率化するために、様々な自動化が図られている。ケースピッキングやパレットピッキングでは、体積や荷重が大きいことから、リフトトラックなどによる運搬に代わり、ロボットによる機械的自動化が行われている。一方、ピースピッキングは商品の形状、寸法などが多種多様であることから、ロボット導入が難しく、コスト的にも合わないことが多い。このため、人間による作業が主流で、多くの場合、パートタイム労働者が仕分け作業に従事している。

この場合でも、作業者の行動を支援する情報提示の効率化や自動化が行われている。これをコンピュータ制御で行っているシステムは、デジタルピッキングシステム（以下、DPS と略して記す）と総称されており、様々な工夫が凝らされ、配送センタ内で実用に供されている。実際、DPS による情報提示に

従い、パートタイム労働者らはもの凄い速度で、商品を選別・収集する作業を行っている。

現行の DPS でもピースピッキングかつゾーンピッキングを対象とした DPS は完成度が高く、完全な実用システムである。筆者らに求められているのは、作業員への新たな情報提示方法として AR/MR 技術を採用し、近未来の DPS で機能拡張や性能向上が図れるか、さらに DPS システムの設計の自由度を増すことができるかの技術的分析・検討である。

### 2.2 関連研究

AR/MR 技術を用いて仕分け作業を支援するためのシステムとしては、既にいくつかの試みがある。

Schwerdtfeger らは AR 技術を用いた 3D オブジェクトによる仕分け作業支援システムを提案した[5]。Reif らは、Schwerdtfeger らのシステムを元に Pick-by-Vision システムを構築し、紙の注文表を見た場合との比較実験を行った[6]。しかし、実験対象としているピッキング方式はピースピッキングではあるが、アソーティングは考慮されていない。

石田らは HMD 付属のカメラでバーコード読み取りをし、音声認識で指示確認や作業切り替えを行う新ゆびキタスピッキングを提案した[7]。しかし HMD には、単に商品の画像や商品位置の図などが提示されるだけであり、MR 型情報提示ではない。

その他、製品の保守点検作業にまで対象を広げても[8]、AR/MR 研究分野には満足できる研究事例はなく、現行 DPS に匹敵するレベルかそれより上を目指すなら、独自の試作システムを構築し、実際に運用して問題点を分析して行くしかなかった。

### 2.3 デジタルピッキングシステムの分析

本研究で我々が比較対象として選んだのは、商用 DPS の 1 つである「ピカトル」(オークラ輸送機製)[9]である。ピカトルは、作業員ごとに担当場所を分けるゾーンピッキングを採用し、各作業員が担当する作業スペースに LED 表示器が埋め込まれた商品棚と集品容器を運搬する自動コンベヤが設置されている(図 1~図 3 参照)。自動コンベヤに乗った 10 個の集品容器は各々が配送先単位に相当し、集品容器に商品を投入することで、同時に複数の注文に対する仕分けを行うことができる。ピカトルでは、ピッキングやアソーティング対象の間口の LED 表示器を緑色に点灯させると同時にその周辺の LED 表示器を赤色に点灯させることで作業員を誘導する。

ピカトルの指示で作業する労働者の動きは、以下の 4 つのステップに大別することができる。

- Step1: 作業員がピッキング対象商品まで移動
- Step2: 商品をピックアップ

Step3: 指定された集品容器まで移動

Step4: 集品容器に商品を投入し、定位置に戻る

作業者は、商品棚の左端を定位置として、これらの作業ステップを繰り返すことで大量の商品を連続して仕分けする。以降では、Step1 から Step4 までの作業工程を 1 タスクと定義する。

一方、上記の作業工程における DPS 側の動作としては、Step1 において、ピッキング対象の間口を示す LED 表示器を点灯すると同時に、商品を投入する集品容器の LED 表示器を点灯する(図 4 参照)。このとき、自動コンベヤに設置された赤外線センサが腕を検知することによって商品投入の判断を行う(図 5 参照)。誤った集品容器に商品を投入すると自動コンベヤ上に設置されたスピーカから警告音が鳴り、次のタスクに進まないような仕組みとなっている。集品容器に正しく商品を投入すると 1 回の作業工程が終了し、この際に作業者は定位置に戻ることによって次の作業工程に備える。

上記の作業工程からわかるように、DPS では、作業者が LED 表示器を見つけるまでの時間が存在し、この LED 表示器を誤りなく素早く発見できるかどうか作業効率の鍵となる。ピカトルでは、商品棚の右端に小型の液晶ディスプレイを設置しており、このディスプレイには対象商品や商品の投入先の集品容器の大まかな位置が表示されている。これによって作業者は、定位置に立っているときにディスプレイを確認することによって大まかな作業内容を把握

することができる。つまり、このディスプレイは仕分け作業において補助的な役割を担っている(図 6、図 7 参照)。

DPS において対象の商品や集品容器の位置にあるライトを点灯するためには、商品や集品容器の位置とライトの位置とを対応付けさせる必要がある。そのため仕分け作業開始前の準備として、各間口に配置された商品の情報や、集品容器の位置、顧客からの注文などを事前に登録する必要がある。このような事前準備はいかなる仕分け作業においても必要不可欠である。

### 3. MR ピッキングシステム

#### 3.1 設計方針

ピカトルを含め現行 DPS の完成度は高く、作業員の作業効率も極めて高い。これを単純に模倣し、AR/MR 情報提示に置き換えただけでは、とても性能的にも価格的にもこれを凌駕するものになるとは思えない。作業時に HMD (Head Mounted Display) を装着することにも抵抗感があると予想できる。それでも、DPS 製造業が AR/MR 技術の導入を望むのは、機械設備や配線などの簡素化や汎用性の向上、複数作業員による作業の能率の向上、新技術導入による新たな方式への展開などへの期待からである。

以上を承知の上で、本研究では商用 DPS であるピカトルを MR 型ピッキングシステムへと置き換えることを目指し、試作システムを実装・運用して、現状技術での問題点を浮き彫りにすることにした。

ピカトルはピースピッキングであるため、開発する MR 型ピッキングシステムが取り扱う商品は、作業者が片手で容易に取り扱い可能なものとして念頭に置く。また、ゾーンピッキングであるため、ピカトル作業者は、担当領域内を激しく動き回る。この移動範囲や移動速度は、これまでの AR/MR システムが未経験の対象である。従来は、ほぼ静止した状態で目の前の対象物の組立て点検を行ってきたからである。具体的課題がある以上、この要求水準に合うよう技術を磨くことは、AR/MR 分野にとっても避けて通れない道筋である。

以上の観点から MR ピッキングシステムを試作開発するにあたり、まずは既存の技術を組み合わせて



図 1 ピカトルの外観  
Fig.1 Look of Pikatoru



図 2 自動コンベヤ  
Fig.2 Automated conveyor

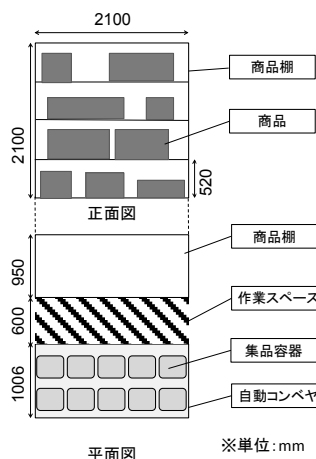


図 3 ピカトルの作業環境  
Fig.3 Working environment



図 4 商品をつかむ様子  
Fig.4 Picking goods



図 5 投入を検出する様子  
Fig.5 Detection of putting

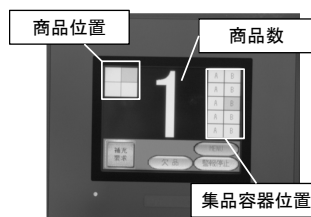


図 6 ディスプレイ  
Fig.6 Display



図 7 ディスプレイの位置  
Fig.7 Position of display

システムを試作し、作業の効率化などが実現可能かを検討することとした。試作システムでは、以下のような情報を提示する。

(1) 商品や集品容器の 3 次元位置情報

図 8(a)に示すように、対象の商品や集品容器の 3 次元位置を枠などの立体的な CG によって提示する。これは DPS におけるランプに相当する情報となる。

(2) 商品や集品容器の存在する方向情報

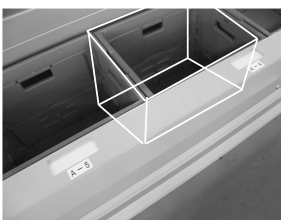
図 8(b)に示すように、作業員に対して常に対象の商品や集品容器のある方向を矢印 CG などで提示する。MR 型情報提示ならではの試みであり、既存の DPS におけるディスプレイ (図 6) での提示内容をより詳細にしたような情報となる。

MR 型の情報提示としては上記に加えて、同一の商品を複数個同時にピックアップする場合に数字を提示する、間違っ商品や集品容器を選んだ場合はエラーメッセージを提示するなど作業の効率化やミスの低減のために様々な情報提示方法が考えられる。試作システムは MR 技術を用いて作業員に情報を提示していることから、提示方法を変更する際に、提示装置の設置と再配線が必要となる既存の DPS に比べると、変更が容易である。そのため、様々な提示方法を試すことができる。

試作システムはゾーンピッキングを念頭に置いていることから、複数人の作業員は同時に各々の担当区域において仕分け作業を行うことになる。各作業員の担当区域は隣接しており、自動コンベヤ上を集品容器が移動することによって、各顧客からの注文に対応するようになっていく。そのため、各々の作業員に必要な商品情報を一元管理し、各作業員は 1 タスク終わるごとに商品情報を受け取ることにする。これを実現するために、試作システムはクライアント・サーバモデルを採用する。サーバで商品情報を一元管理し、1 タスク終了後、クライアントはサーバから商品情報を取得する。

これらを元に設計した試作システムのシステム・アーキテクチャを図 9 に示す。

(1) サーバ: サーバは接続要求してきたクライアントごとにスレッドを生成する。このスレッドは商品情報をデータベースから取得し、クライアントに送信する。



(a) 対象物の強調



(b) 対象物への誘導

図 8 MR 技術による仕分け作業支援システムのイメージ  
Fig.8 Image of MR picking system

(2) クライアント: クライアントは画像取得、位置姿勢検出および MR 画像の提示機能を有し、これらの処理をリアルタイムで実行する。また仕分け作業が 1 タスク終わるごとにサーバと通信を行い次の商品情報を取得するといった作業管理機構も存在する。

3.2 機器構成

試作システムは以下に示すデバイスで構成した。クライアントの位置姿勢を推定する手法としては、簡便な手法としてクライアントに接続したカメラ画像を利用することとした。

(a) HMD: 作業員の視界内に MR 情報を提示する。作業員は HMD を装着することで両手を自由にでき、常に視界内で情報をとらえることができる。

(b) モバイル PC: バックパックに入れて保持する。この PC はクライアントとしてサーバから無線 LAN を介して商品情報を受信する。上記の HMD はこのモバイル PC に接続する。また、入力用のデバイスやカメラなどを接続している。

(c) サーバ PC: 作業員から離れた場所に設置し、事前準備として作業員ごとの仕分けする商品や集品容器の位置を登録する。仕分け作業を実施する際には、商品情報と作業員ごとの作業進捗を管理する。

3.3 処理の流れ

サーバとクライアントにおける処理の流れを図 10 に示す。サーバは、商品情報データベースからクライアント毎に準備された商品データリストを取得し、クライアントからのリクエストを受け取るまで待機する。クライアントからのリクエストを受信すると、クライアント ID に基づいて商品データリストを確認し、商品情報を送信する。一方、クライアントでは、2 つのスレッドを並列に実行する。1 つのスレッドは、MR を実現する上で必要な現実世界の光景を取得し、その光景と商品情報に合わせた位置に CG を描画する。もう 1 つのスレッドは、商品を「つかむ」、集品容器に「投入する」といった作業員の動作をトリガーとして、サーバに接続し、商品情報を

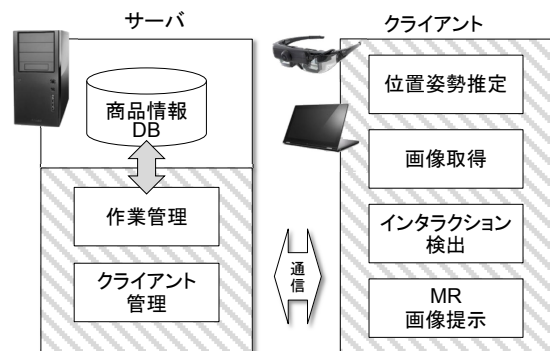


図 9 システム・アーキテクチャ  
Fig.9 System Architecture

取得する通信スレッドである。

以下は、詳細な処理内容である。

(1) 初期化処理

試作システムも既存のピッキングシステムと同様に事前準備を必要とする。仕分け作業を行うにあたって1タスクに必要な情報は以下の3つである。

- ・ピッキング対象商品の位置
- ・連続でピッキングする商品数
- ・投入する集品容器の位置

これらの3つの情報の中でもピッキング対象商品の位置は商品棚における商品の配置に依存するため、商品の配置を動かすごとに実測する必要がある。これらの必要な情報を作業ごとに表として作成し商品情報DBに登録することで事前準備は完了する。

初期化処理では事前準備で得られた情報を商品情報DBから読み込む。

(2) 位置姿勢推定

試作システムでは、位置姿勢推定の手法としてクライアントに装着したカメラ画像に基づく手法を採用した。ベースにしたのはマーカを利用するタイプの手法であるが、マーカの端が欠けるなどした場合に位置姿勢推定が破綻することも想定された。そこで図11に示すような処理を導入した。この処理では、位置姿勢推定が破綻した場合は、まずは画像による特徴点トラッキングを行い、それでも破綻した場合はセンサを利用したヘッドトラッキングを行う。

特徴点のトラッキング手法として Lucas-Kanade 法を用いている[10]。マーカを用いた位置姿勢推定が成功している時に画像中から特徴点を検出する。検出された特徴点は任意の座標系において座標値が既知であるため、これを利用してトラッキング時の位置姿勢を推定する。追跡が必要な特徴点数を閾値として予め定め、その条件を満たしていない場合は破綻と判断し、ヘッドトラッキングに処理が移行する。このヘッドトラッキングには HMD に付属のジ

ャイロセンサを使用した。

(3) インタラクションの検出

商品を「つかむ」、集品容器に「投入する」といった作業者の動作を検出する処理にあたる。例えば、既存の DPS では、2.3 節で述べたように赤外線センサを用いて商品の投入を検出している。

(4) MR 画像の描画

作業者に対して、商品位置や集品容器の位置を把握しやすいような MR 情報を提示する必要がある。先行研究の評価実験[11]での知見をもとに図12に示すようなCGを作業者の視界に提示する。商品や集品容器の3次元情報は(a)に示すように立方体形状のワイヤフレームを、商品や集品容器の存在する方向情報は(b), (c)に示すように2パターンを用意した。(c)は文献[12]を参考に作業者から商品位置までをつなぎ、CG 配置には3次ベジェ曲線のアルゴリズムを応用する。作業者と商品の位置情報をそれぞれ  $P_w$  および  $P_g$ 、各々の位置から任意の前方位置を制御点  $P_{pw}$  および  $P_{pg}$  とすることで3次ベジェ曲線を用いた誘導のCGを生成することができる。

4. 評価実験

4.1 実験方法

本実験に先立ち、等間隔の4段ある本棚に各々3~4つの商品を置き、対面に集品容器を5つ置いた模擬空間で予備実験を行った[11]。その結果、ビデオシースルー型 HMD より光学シースルー型 HMD のほうが良い結果と好印象な意見を得たため、本実験では、光学シースルー型 HMD による MR 型システムと既存の商用 DPS であるピカトルを比較するため両システムともに未経験の7名(20代男性5名, 40代男性1名, 20代女性1名)に対して評価実験を行った。実験内容は表1に示す3項目である。いずれの項目も同じ12タスクの仕分け作業である。

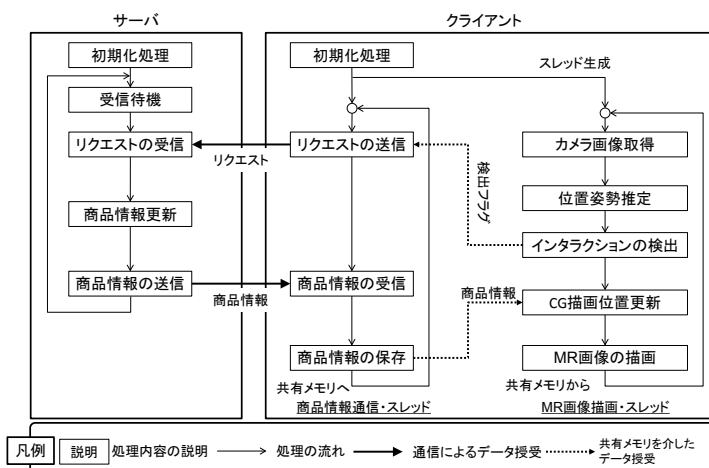


図10 サーバとクライアントの処理の流れ  
Fig.10 Flowchart of the server component and client component

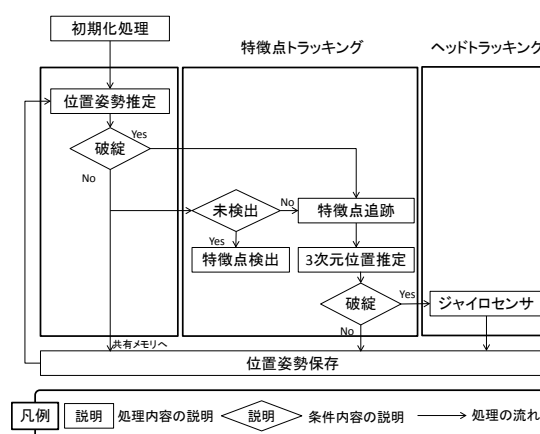


図11 位置姿勢推定の処理の流れ  
Fig.11 Flowchart of the pose estimator

各々の被験者は全員同順(実験 1→実験 2→実験 3)で実施したが, 1 項目実施する毎に 2~3 時間の間隔を設け, かつ実験中以外の被験者は別室で待機しているためタスク順は覚えていないものとする. 商品棚や集品容器の配置などの条件を統一するため, 本実験はすべて同一工場の同一ゾーンで実施した.

商品棚は 4 段存在し, 各段には等間隔に 6 つの商品群が配置してある. また自動コンベヤには 2 段 5 列で集品容器が置かれている. すなわち, 被験者は 24 種類の商品から 1 つの商品をつかみ, 10 個の集品容器の内 1 つに商品を投入することになる. 商品棚および自動コンベヤの形状は図 3 に示したものと同一である.

4.2 実験機器

本実験で使用したクライアント端末と HMD の仕様を表 2, 表 3 に示す. 使用した HMD はモバイル PC に接続しており, HMD のディスプレイ間のブリッジ上方にトラッキング用のカメラ, レンズとつるを接続する蝶番付近にヘッドトラッカーを搭載している. インタラクションの検出はマウスクリックで代用し, 商品をつかんだり, 投入したりするたびに, 被験者が手に持ったマウスをクリックする(図 13 参照). また被験者の位置姿勢推定は ARToolKitPlus により行う[13]. 事前に, 1 辺の長さが 40.0[mm], 80.0[mm], 120[mm], 160[mm]の ARToolKitPlus マーカを準備し, マーカの認識率や商品のピックアップやアソーティングに不具合が生じない大きさを検討した. その結果, 棚板の高さやマーカの認識率などを考慮して, 全てのマーカの 1 辺の長さを 80.0[mm]に統一した. マーカは図 14 に示すように 1 段あたり 6 枚, 商品棚や自動コンベヤの LED 表示器を覆うようにマーカ間の間隔を 300[mm]の等間隔で設置する. このときのトラッキング用カメラに

よるマーカの認識範囲を図 15 に示す. また, 試作システムにおいて ARToolKitPlus マーカによる位置姿勢推定に必要な時間は平均 17.1[msec]である.

本実験ではサーバとクライアントの両アプリケーションをモバイル PC で起動していることから, 通信遅延は平均 21.4[msec]である. 一方, MR 画像は 19.3[msec]で更新している. 通信と描画は別スレッドで動作させていることから, 1 タスク終了後に, 次の商品情報を考慮した MR 画像を生成するまでの時間は最も遅くなる場合で, MR 画像を 2 回更新する時間である 38.6[msec]となる.

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[14]. Bonita は, 光学式モーションキャプチャ・システムの廉価版(表 4 参照)であり, 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.

4.3 実験の考察

各々の実験における被験者ごとの平均時間を図 16 に示す. 被験者 7 人の平均時間は実験 1 が 14.7 [sec], 実験 2 が 13.5 [sec], 実験 3 が 4.90 [sec]であった. また正答率は実験 1 が 42.9%, 実験 2 が 44.6%, 実験 3 が 99.4%であった. 予想通り, 現時点では,

表 1 実験内容  
Table 1 Content of experiment

実験項目	実験 1	実験 2	実験 3
システム	MR ピッキングシステム		ピカトル
デバイス	光学シースルー型 HMD		LED 表示器
表示内容	図 12(a),(b)	図 12(a),(c)	

表 2 光学シースルー型 HMD の仕様  
Table 2 Specification of the optical see-through HMD

型番	Vuzix 製 STAR 1200XL	
重量	85g	
カメラ	視野角	35°
	解像度	1920 × 1080pix
	フレームレート	60Hz
ディスプレイ	解像度	852 × 480pix
	フレームレート	60Hz
ヘッドトラッカー	ジャイロ分解能	<0.25° /s

表 3 モバイル PC の仕様  
Table 3 Specification of the mobile PC

型番	PC-GL 19614GU
OS	Windows 7 Professional 64bit
CPU	Intel Core i7-3517U
Memory	4096MB RAM
Video Card	Intel HD Graphics 4000
重量	875g

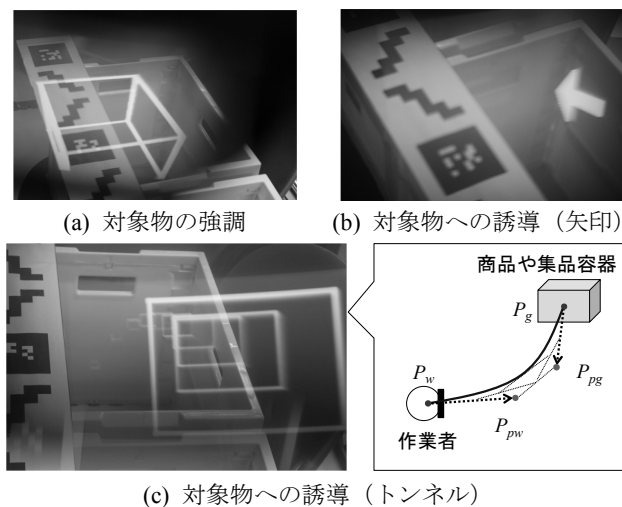


図 12 MR ピッキングシステムの実装例  
Fig.12 Implementation of MR order picking system



完成度の高い既存 DPS を使用した時が最も速く正しい作業が実施できることが確認できた。そこで、既存システムと試作システムにおける被験者の位置姿勢を比較することにより、試作した MR システムの問題点を洗い出す。

図 17(a), (b)は実験 1, (c)は実験 3 での任意の 1 タスク（下から 3 段目右から 3 つ目の商品をピックアップし、下段の左から 3 つ目の集品容器にアソーティング）における被験者の頭部の位置姿勢である。図中の四角錐は、被験者の視界を表現している。実験毎に作業完了までの時間が異なることから、図 17(a), (b)では 1.33 [sec]ごとに、図 17(c)では 0.667 [sec]ごとに頭部の位置姿勢を描画した。また図 18 は被験者の頭部の回転量と速度を表している。同様に図 19 は被験者の頭部の回転量と速度である。図 18 の回転量は、1 タスク開始時の Roll,Pitch,Yaw 全ての値を初期値 0 とし図示している。



図 13 作業風景と本実験で使ったデバイス  
Fig.13 Work and device using this experiment



図 14 実験環境  
Fig.14 Experiment environment

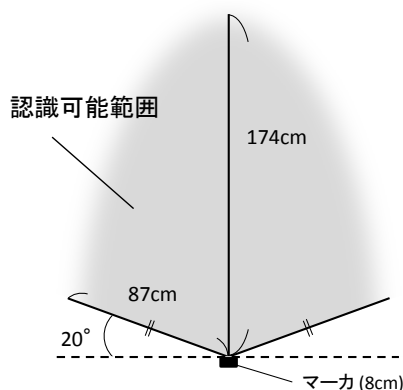


図 15 マーカの認識範囲  
Fig.15 Recognition range of marker

図 17(c)と図 18(c)から読み取れるように、ピカトルを用いた作業では、作業者は LED 表示器を見つけ、商品をつかむと、すぐに集品容器に商品を投入していることがわかる。一方、図 17(a), (b)と図 18(a), (b)を見ればわかるように試作システムではピカトルに比べ作業者の動きが遅く、上下左右への姿勢変化が見受けられる。また図示した 1 タスクにおける被験者の移動量は、実験 1 の被験者 2 が  $5.19 \times 10^3$  [mm], 被験者 5 が  $5.89 \times 10^3$  [mm]であり、実験 3 の被験者 2 は  $2.65 \times 10^3$  [mm]である。

本実験では、被験者の頭部で位置計測を行っていることから、被験者が立ち止まっても、姿勢変化によって被験者の移動距離は加算されることと、図 18(c)に示す回転量は図 18(a), (b)と比較して滑らかなグラフであることから、試作システムにおいて被験者の上下左右への姿勢変化はピカトルに比べて大きいことがわかる。この要因は複数考えられるが、その 1 つは、CG の描画遅延である。

本実験では、光学シースルー方式を採用したため、作業者が連続的に動いている場合、位置姿勢を推定して CG を描画するまでに、19.3 [msec]の遅延が生じる。遅延の結果生じる CG のずれは、作業者頭部の移動速度が増すにつれて顕著になるため、これが作業者の動きがゆっくりになるなどの影響を与えた可能性がある。また、実験には眼鏡型の HMD を用いたため装着感が乏しく、HMD がずれることを恐れて動作が緩慢になった可能性もある。

表 4 Vicon 社 Bonita の仕様  
Table 4 Specification of VICON Bonita

フレームレート	30 - 240Hz
センサ解像度	30 万画素 (640 × 480pix)
焦点距離	4 - 12mm
画角	広角 93.7° × 68.9° 望遠 31.2° × 23.4°
撮影距離	0.3m - ∞

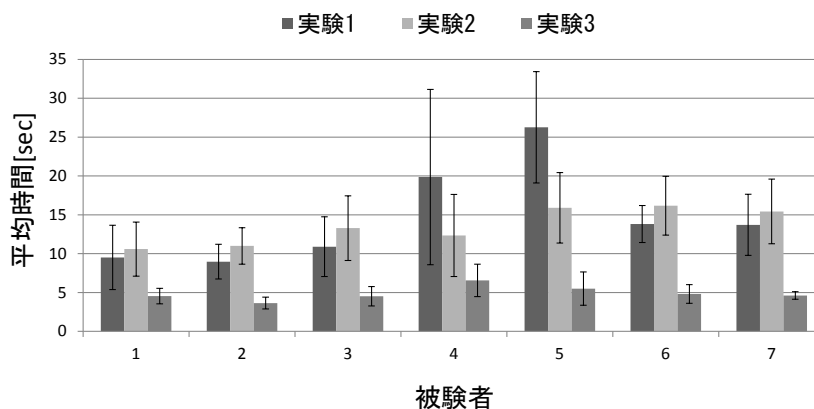


図 16 実験結果  
Fig.16 Experimental result

この他にも、遠近感の不足や人間の視野角とHMDの表示領域の差異などが要因として考えられ、これらが複合して作業者の動きが遅くなったと推測できる。それに対してピカトルでは、被験者は商品をピックアップした時点で、すでに集品容器に向かって姿勢を変化しているなど、すばやい動きを実現している。

図19より商品をピックアップするとき、被験者の動きは遅くなるが、商品をアソーティングするためには、あまり減速せず、アソーティング後、初期位置に戻るために徐々に速度を落としていることがわかる。これは商品棚にある商品をピックアップする動作に比べ、アソーティングする動作は、商品を大雑把に扱うことに起因すると考えられる。

次に、試作システムにおいて正答率が低くなった要因について検討した。実験1におけるピッキング時の正答率は15.6%、アソーティング時は59.3%、実験2におけるピッキング時の正答率は14.6%、アソーティング時は63.4%である。このことからピッキング時よりもアソーティング時の方が正答率が高いことがわかった。

図17(a)は実験1において最も作業時間が短かった被験者の動きの一例である。この図からわかるように作業開始時に被験者は商品棚の左端に立ち、商品をつかむと体を回転させ集品容器の正面を向き商

品を集品容器に投入している。図3に示すように作業スペースの幅は600mmと限られていることから、Step1のとき被験者は商品棚全体を見渡せるように左端に立ち、斜めから棚を見ることになる。

一方、商品投入時(Step3)には、対象商品をつかんだ後に後ろを振り向くことで、集品容器を正面から見て商品を投入することが可能である。そのためピッキング時と比べてアソーティング時の精度が高くなったと推測できる。被験者個人の正答率に目を向けてみると、ピッキング時における実験1の被験者2、被験者7の正答率は25.0%と16.7%、実験2の被験者3の正答率は25.0%であるが、アソーティング時の正答率は共に100%である。図17(b)は同じタスクにおける被験者5の位置姿勢と動線である。被験者5は図16に示すように作業時間が最も長い。図18(a),(b)から読み取れるように、被験者2と被験者5とを比べた場合、被験者5はピックアップするまでの回転量がより多く、特にYawが顕著に表れている。ピックアップする商品が高さ約 $1.40 \times 10^2$  [mm]に配置されていることから被験者5は商品棚の正面を向いてから商品をつかむような動作を行っていることがわかる。一方、被験者2は商品棚の正面を向く前に商品をつかんでおり、図17(a)からも読み取れるように対象商品に隣接する商品群から商品をつかんでいる。

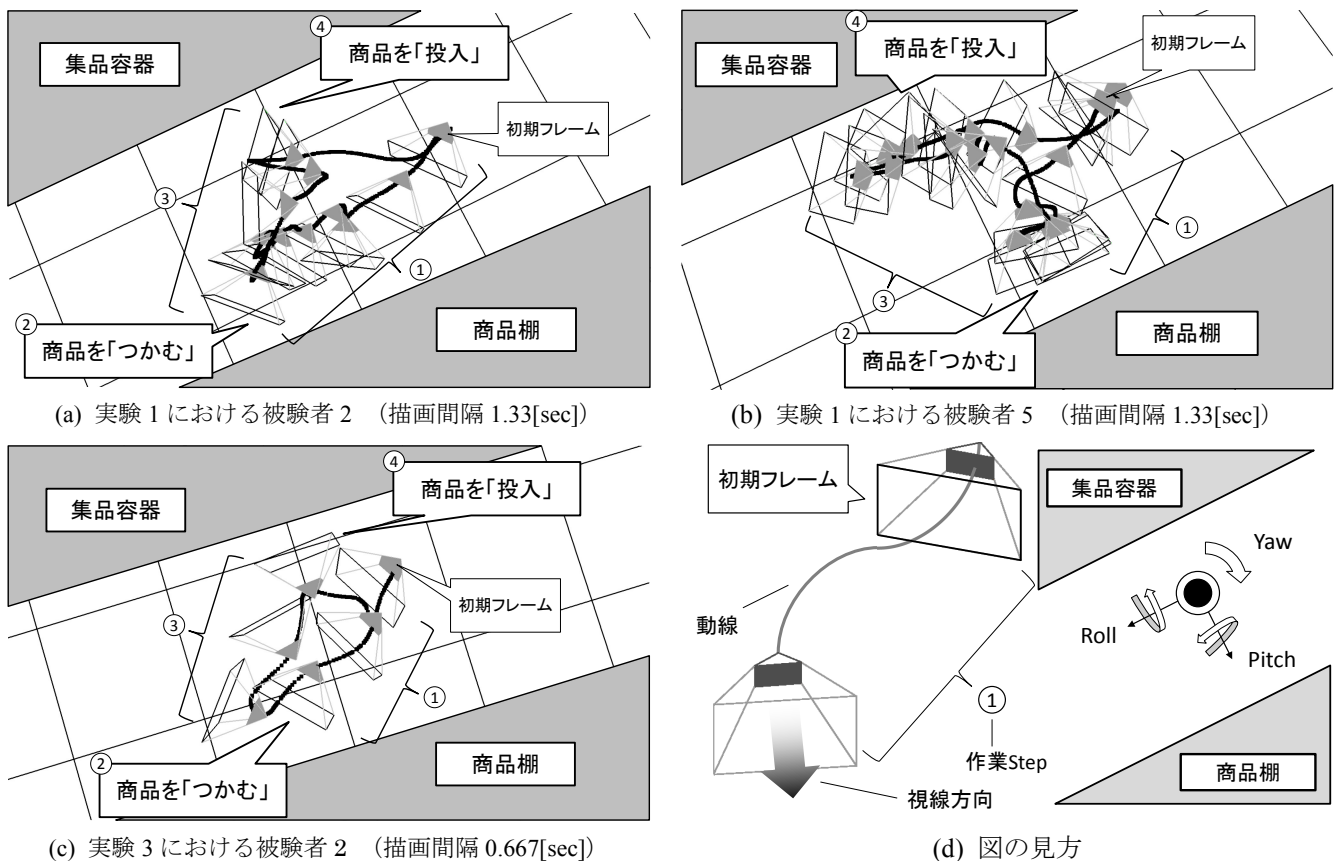


図17 被験者の位置姿勢  
Fig.17 Subject's position and orientation



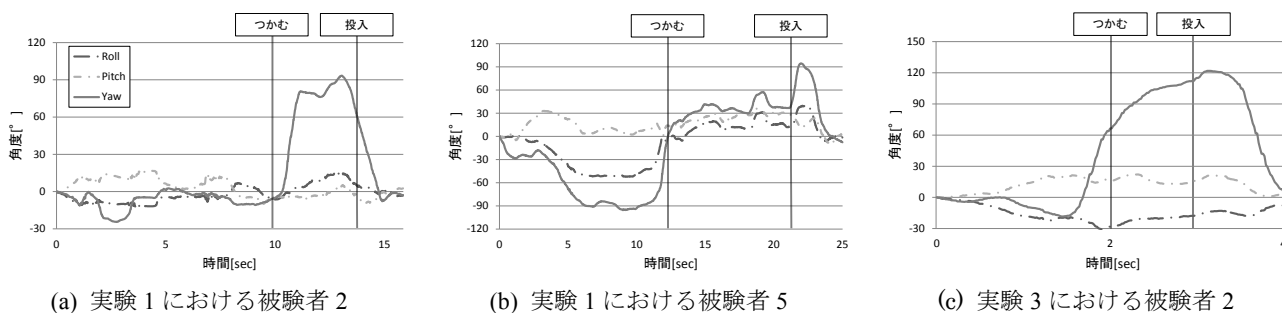


図 18 被験者の回転量

Fig.18 Subject's rotation

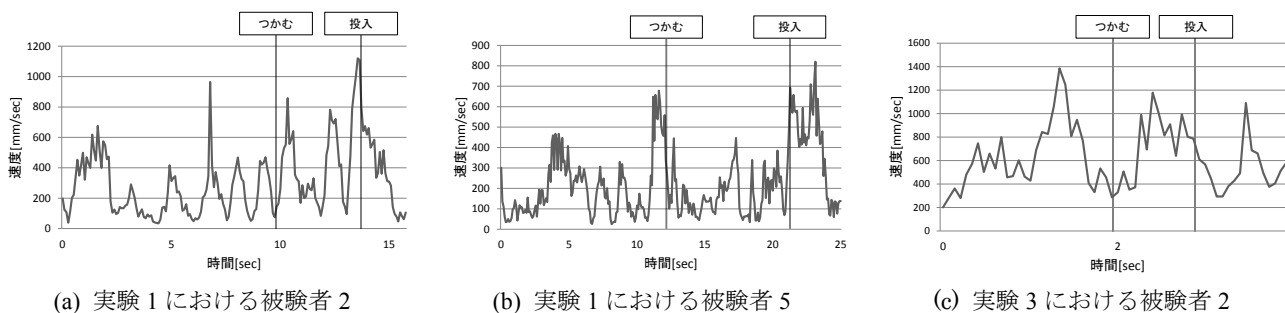


図 19 被験者の速度

Fig.19 Subject's speed

これらのことからピッキング時の間違いのほとんどが、被験者が商品棚を斜め前から見たときに提示された CG が手前の商品を指しているのか、奥の商品を指しているのかの判断が難しいことが原因であると考えられる。試作システムにおいてピッキング時の正答率は、平均が 15.6% に対して、被験者 5 は 58.3% を記録しており、正面から提示された CG を見るような工夫を取り入れることによって正答率は上昇すると予想される。本研究の予備実験[11]において、正答率が高かったのは 1 段 3~4 個の商品しか配置していなかったため、隣接した商品がなく紛らわしさが生じなかったことに起因すると考えられる。参考までにピッキング時において、左右に隣接する商品をつかんだときも正解とした場合の正答率は、実験 1 では 55.2%、実験 2 では 65.6% となる。

また被験者の視点位置によっては上下の商品も間違いやすい傾向にあることがわかった。特に 1 段目の商品は被験者から見下ろすかたちで商品を見つけるため、誤って 1 段目より上の段の商品位置をつかむ確率は、実験 1 では 71.9%、実験 2 では 50.0% と商品のつかみ間違いの一要因となっている。

本実験における被験者の意見は次のとおりである。

#### (a) MR ピッキングシステム

- ・ HMD が重い
- ・ 商品に近づいているかどうか判断できない
- ・ 対象でない商品がわかるようにしたほうがよい

#### (b) 現行 DPS (ピカトル)

- ・ LED 表示器が発見しにくい

#### 4.4 今後の展望

現行の完成度の高い DPS と試作 MR システムでは、作業効率面では勝負にならないことは当初予想した通りであった。むしろこの実験で得たものは、それでも AR/MR 化を進める上で考慮すべき課題が明らかになったことである。

提示した CG の奥行きがわかりにくいことから、縦方向の対策としては段ごとに提示する CG の色を変更するなど、段ごとの違いを強調することが考えられる。一方、横方向の対策としては、1 段に置く商品の数が任意であることから、右から奇数番目の商品と偶数番目の商品とで提示する CG の形状を変化させるなど、隣接する商品同士を区別するための工夫が必要である。

また作業者の視界内に提示している誘導のための CG の大きさを、商品と作業者との距離に比例させることによって、作業者が商品に近づいていることを知覚させるといった工夫が考えられる。さらに対象の商品や集品容器に注目するだけでなく、対象外にも工夫を凝らす余地がある。

#### 5. むすび

AR/MR 技術に関する報道が増えるにつれ、社会的関心が高まり、産業界からその実利用に関する解決策や問題解決支援が求められるようになってきた。我々は、AR/MR 技術を低コストで日常的な課題に対応できる技術体系に育て上げる研究の一環として、商品物流における仕分け作業に活用することを試み

た。これは現行 DPS の製造業からの要請に基づくものであるが、いきなり既存の商用システムを置き換えるのではなく、今後、AR/MR 化を図って行く上で問題点を分析し、その結果を報告した。

MR 型の試作システムを実装・運用した結果は、予想通り、現行 DPS には劣るものではあったが、AR/MR 化を推進する上での貴重な指針が得られた。とりわけ、作業者の動きを詳細に分析することで、試作システムの抱える問題点が明らかになり、今後の開発の方向性が明確になったと言える。仕分け作業以外にも、全自動化が難しく、人手の作業に頼らざるを得ない分野は数多くあるので、今回の試作システム開発や運用で得た知見は、そうした分野に役立つことも期待している。

**謝辞** 本研究の開発・実装作業の一部を担当した大学院生・松田祐樹氏（現在、任天堂株式会社）に感謝の意を表す。なお、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] H. Tamura, H. Yamamoto, and A. Katayama: Mixed reality: Future dreams seen at the border between real and virtual worlds, *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 21, No. 6, pp. 64 - 70 (2001.11)
- [2] W. Friedrich: ARVIKA - Augmented reality for development, production and service, Proc. 1st Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2002), pp. 3 - 4 (2002.9)
- [3] 特集: 拡張現実感, 情報処理, Vol. 51, No. 4 (2010.4)
- [4] 鈴木震: 配送センターシステム -オーダーピッキングのポイント-, 成山堂書店 (1997.7)
- [5] B. Schwerdtfeger and G. Klinker: Supporting order picking with augmented reality, Proc. 7th Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2008), pp. 91 - 94 (2008.9)
- [6] R. Reif, W. A. Gunthner, B. Schwerdtfeger, and G. Klinker: Pick-by-Vision comes on age: Evaluation of an augmented reality supported picking system in a real storage environment, Proc. 7th Int'l Conf. on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa (AFRIGRAPH 2009), pp. 23 - 31 (2009.2)
- [7] 石田正人: 物流作業を効率化する次世代ピッキングシステム—音声認識&ヘッドマウントディスプレイ式ハンズフリーピッキング「新ゆびキタスピッキング」, 自動認識, Vol. 23, No. 13, pp. 12 - 18 (2010.11)
- [8] S. Henderson and S. Feiner: Evaluating the benefits of augmented reality for task localization in maintenance of an armored personnel carrier turret, Proc. 8th Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2009), pp. 135 - 144 (2009.10)
- [9] ピカトルシリーズ|ピッキング設備|オークラ輸送機: [http://www.okurayusoki.co.jp/product/plant/picking/pikat\\_ou.html](http://www.okurayusoki.co.jp/product/plant/picking/pikat_ou.html)
- [10] B. D. Lucas and T. Kanade: An interactive image registration technique with an application to stereo vision,

Proc. Image Understanding Workshop, pp. 121 - 130 (1981.4)

- [11] 山崎賢人, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: 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 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 13B-5, pp. 196 - 199 (2013.9)
- [12] F. Biocca, A. Tang, C. Owen, and F. Xiao: Attention funnel: Omnidirectional 3d cursor for mobile augmented reality platforms, CHI '06 Proc. SIGCHI Conf. on Human Factors in computing System, pp.1115 - 1122 (2006.4)
- [13] D. Wagner, and D. Schmalstieg: ARToolkitPlus for pose tracking on mobile devices, Proc. 12th Computer Vision Winter Workshop (CVWW 2007), pp. 139 - 146 (2007. 2)
- [14] Vicon | System: <http://www.vicon.com/System/Bonita> (2014 年 3 月 17 日受付)

### [著者紹介]

#### 山崎 賢人 (学生会員)



2013 年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒。現在、同大学院情報理工学研究科博士前期課程在学中。複合現実感を用いた作業支援システムの研究に従事。

#### 柴田 史久 (正会員)



1999 年阪大・基礎工・博士後期課程了。阪大産業科学研究所助手を経て、2003 年 4 月より立命館大学理工学部助教授。同大学情報理工学部准教授を経て、現在、同教授。博士（工学）。モバイルコンピューティング、複合現実感等の研究に従事。本学会複合現実感研究委員会幹事。本学会学術奨励賞・論文賞等を受賞。

#### 木村 朝子 (正会員)



1998 年阪大・基礎工・博士前期課程了。同大学助手、立命館大学理工学部助教授、JST さきがけ研究員等を経て、2009 年 4 月より立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授。現在、同教授。博士（工学）。実世界指向インタフェース、複合現実感、ハプテックインタフェースの研究に従事。本学会学術奨励賞・論文賞、HI 学会論文賞、情報処理学会山下記念研究賞等を受賞。

#### 田村 秀行 (正会員)



1970 年京大・工・電気卒。電子技術総合研究所、キヤノン（株）等を経て、2003 年 4 月より立命館大学理工学部教授。現在、同大学総合科学技術研究機構教授。工学博士。画像情報処理、人工知能、複合現実感の研究開発と実用化に従事。本学会フェロー、元理事。現在、評議員、複合現実感研究委員会顧問。本学会及び情報処理学会論文賞、人工知能学会功労賞等を受賞。