

コンシューマ・システム論文

深度カメラを用いた ピッキング工程における作業ミス検知システム

宇田 吉広^{1,a)} 吉田 和広² 村田 嘉利¹

受付日 2015年10月1日, 採録日 2016年2月23日

概要: 物流事業における配送センタや自動車組立工場におけるオフラインピッキング工程では, 人が指定された棚の間口から物品を取り出して別の箱に仕分けるピッキング作業が広く行われている. ピッキング作業において, 指定された間口以外から物品を取り出した作業ミスを後工程で検出しようとする, 多大な労力が必要となる. 本論文では, 深度カメラとして Microsoft 社の Kinect を使用することで, 既導入の取り出す間口を表示するデジタルピッキングシステムになんらの修正を施すことなく, 作業ミスを検知するシステムを提案する. プロトタイプシステムを作成し, 実験室のほか, 実稼働している自動車組立工場の生産ラインやデジタルピッキングシステムを開発している企業の評価設備に持ち込み, 性能評価した結果, 良好な性能であることが確認された.

キーワード: 深度カメラ, MS-Kinect, ピッキング工程, 作業ミス検知

Operation Error Detection System in Picking Processes by Camera Depth Sensors

YOSHIHIRO UDA^{1,a)} KAZUHIRO YOSHIDA² YOSHITOSHI MURATA¹

Received: October 1, 2015, Accepted: February 23, 2016

Abstract: The picking process to take out goods from a designated slot of a rack and put them into a tray is widely used in distribution centers of logistics as well as off-line picking sections of automotive plants. Picking error detection in post-process requires a lot of man-power. This paper proposes an operation error detection system utilizing MS-Kinect as depth sensors. The system is easily equipped to the existing digital picking system which illuminates lamps to indicate the right slot of a rack. Performance tests for the developed prototype were carried out not only in the laboratory but also in an automotive assembly plant in operation and an evaluation room of a digital picking system vendor. The developed system showed high performance to detect picking errors and applicability for fool-proofing systems in the picking process.

Keywords: depth sensor, MS-Kinect, picking process, operation error detection

1. はじめに

物流事業における配送センタでは, 倉庫から搬出された物品が棚に収容され, 作業者が指定された物品を棚の間口

から取り出してトレイへの仕分を行うピッキング工程がある. 大規模な物流センタでは, ピッキング工程が作業全体の 60~70%を占めるという報告があり, 非常に重要な工程である [1]. 同様のピッキング作業は自動車工場などの製造業でも広く用いられている [2].

ピッキング工程で作業ミスが生じると, 要求されたものとは異なる物品を次の工程に渡してしまうことになる. 後工程でこの作業ミスを検知しようすると多大な労力を必要とする. 作業ミスを防止するには, 以下の手順が重要である [3]:

¹ 岩手県立大学大学院ソフトウェア情報学研究科
Graduate School of Software and Information Science, Iwate Prefectural University, Takizawa, Iwate 020-0693, Japan

² 岩手県立大学ソフトウェア情報学部
Faculty of Software and Information Science, Iwate Prefectural University, Takizawa, Iwate 020-0693, Japan

a) uda@ieee.org

- a. 作業員に対してどの間口から物品を取り出すかを指定.
- b. 指定した間口から正しく物品を取り出したか否かの確認.
- c. 所定のトレイにピッキングした物品を入れたか否かの確認.

a. の取り出す間口の提示については、いろいろな製品や先行研究がある。たとえば、株式会社アイオイ・システムのライトモジュールは、棚の間口に取り付けたランプを点滅させ、作業員に物品を取り出す間口を示す。作業員は指示された個数取り出した後、スイッチを押してランプの点滅を消し、指示された間口にアクセスしたことを確認するシステムである [4]。b. の作業員が指定された間口から物品を正しく取り出したか否かの検知は、これまでの研究では実現できていない。また、c. の取り出した物品を正しいトレイに入れたか否かの検知については、製品レベルはもとより研究レベルでも報告がない。

本研究では、Microsoft-Kinect を利用することでピッキング作業ミスを検知するシステムを開発し、その性能評価を行った。評価実験は大学の実験室のほかに、実稼働している自動車組立工場の生産ラインとデジタルピッキングシステム（以下 DPS と略記）を開発している企業の評価設備で実施した。いずれの実験でも部品取り出しのために手を入れた間口を 100%に近い確率で検知できた。システム構成およびその性能評価について報告する。

2 章では、関連研究について述べ、3 章でセンシング方式の選択について述べる。4 章では、MS-Kinect を用いたセンシングシステムの構成について詳述し、5 章では、実験室で行ったシステムの評価実験とその結果について述べる。6 章では、稼働中の自動車工場などで実施した試作システムの評価実験と評価結果について述べ、最後に 7 章でまとめる。

2. 関連研究

株式会社アイオイ・システムが提供している L-PICK システムのライトモジュールでは、物品を取り出す棚の間口ごとにランプスイッチと数字表示器を取り付ける。作業員は、ランプが点滅している間口から物品を表示器に示された個数取り出したら、スイッチを押して点滅を消す。類似の機能を持つ製品は国内外で各社から供給されている [5]。

これらのシステムでは、正しい位置の間口から指定した個数を取り出したか否かの確認はできない。また、作業員が指示された間口を勘違いして別の間口から取り出したときのミスは指摘できない。

このような DPS とは別に、透過型ヘッドマウントディスプレイを利用してピッキングする部品棚を示すシステムが提案されている。Schwerdtfeger らは、Augmented Reality 技術を応用して透過ディスプレイ上に取り出す間口を指し示すフレームを表示するようにしている [6]。また、山

崎らは HMD (Head Mount Display) による MR (Mixed Reality) 技術を用いて、対象となる物品の強調や誘導を行っている [7]。Baumann らは、HMD 上に取り出す間口を表示するとともに、正しく取り出し作業をしたか否かを LRF (Laser Rangefinder) で確認するシステムを提案しているが、LRF は作業ミスの検出に十分な効果が得られなかったといっている [8], [9]。佐藤らは、地磁気センサを利用し、地磁気の変化から自動車組み立て工場における部品の組み付け作業をトレースしている [10]。組み付け工程は、身体の回転運動が大きく、それにとまなう地磁気の変化も大きいことから、どの位置の組み付けを行っているかを検知可能である。一方でピッキング作業は物品を取り出す間口の位置はそれぞれに異なるが、身体の動きに大きな違いが見られないことから、地磁気の変化を利用してどの間口から取り出したかを検知するのは困難である。

Leap motion controller は、半径 0.5m 程度の範囲で指の位置を高精度に検知できるが、開口面が数 m ある部品棚を対象にするのは不可能である [11]。超音波を利用して手の位置を計測することは可能であるが、まだ研究レベルであり、実験に利用できるデバイスが提供されていない。

3. センシング方式の選択

3.1 システムへの要求条件

物流事業における配送センタでは、倉庫や配送車両から搬出された物品が所定の棚の間口に収容され、作業員が注文を受けた物品を棚の間口から取り出してトレイへの仕分けをするピッキング作業を行う。本研究では、物品棚の間口からの取り出しミスの検出に絞る。その際、1つの間口には 1種類の物品しか収納されていないとする。この前提から、正しく物品取り出しが行われているかの判定は、物品そのものの取り出しではなく、物品棚の間口に手を入れた動作をセンシングすることで代替する。指定以外の間口からの物品取り出しを検出したら警報を出すシステムに要求される事項として以下の 4つが考えられる。1つの間口に複数の物品が収納されている場合、各物品にタグをつけて管理する必要があるが、ここでは対象外とする。

(1) センシングのための機器追加

手が間口に入ったことのセンシングに必要な機器の追加や工事は少ないほどよい。

(2) 照合機能の規模

DPS が指定した間口と手を入れた間口を照合する必要がある。その実現のための開発規模は少ないほどよい。

(3) 作業員の負担増

物品の取り出し動作以外に本センシングのための動作の追加は作業員の負担増になるので、少ないほどよい。

(4) 作業ミスの検出精度

要求される作業ミスの検出精度は適用先によって異なるが高いにこしたことはない。DPS を開発している

表 1 センシング方式の比較
Table 1 Sensing method comparison.

方式	バーコード	Active RFID	Passive RFID	光電センサ	重量検出	手の追跡
センシングのための検器追加	必要	必要	必要	必要	必要	不要
照合機能の検出	必要	必要	必要	必要	必要	不要
作業者の負担	大	小	中	なし	なし	なし
作業ミスの検出精度	高い	中	高い	中	高い	要検証

企業では90%以上であれば多くの場所に適用できるといっている。

3.2 センシング方式の比較評価

間口に手を入れたことをセンシングする方法としては、以下の6種類が考えられる。

- (1) バーコードのタグをリーダで読み取る方式
- (2) Active RFID のタグをリーダで読み取る方式
- (3) Passive RFID のタグをリーダで読み取る方式
- (4) 光電センサにより手を入れたことをセンシングする方式
- (5) 重量センサにより物品の重量を計測し、値に変化があれば手を入れたとセンシングする方式
- (6) 光学的に手を追跡する方式

システムへの要求条件をふまえて各方式を比較した結果を表 1 に示す。

以下、各方式について詳細に述べる。

(1) バーコード方式 [12]

バーコードをタグとして物品棚の間口に貼り付け、これを作業者の手に装着したリーダで読み取ることで間口に手が入ったと認識する。物品棚の間口へのタグの設置とともに、作業者の手にリーダの装着が必要となる。リーダが読み取った情報を DPS 側で指定した間口と同じであるか照合する必要がある。DPS への間口照合機能の追加が必要となる。確実にタグを読み取るためには作業者は手につけたリーダをタグにかざす必要がある。その後で物品を取り出すことになり、負担が増える。タグを確実に読み取れば、検出精度は高い。

(2) Active RFID 方式 [13]

バーコードの代わりに Active RFID をタグとして用いる方式である。バーコード方式と同様にタグの設置と作業者へのリーダの追加が必要である。タグとリーダの間に手が入ったことを非接触で検出できる。Active 方式は、電波の到達距離が大きくとれるという利点がある反面、間口内の物品や間口に入れた手の影響で電波の到達範囲が変化するという問題がある。そのため、間違っただけに取り付けられたタグをリーダが読む確率が高くなりがちである。この方式もバーコード方式と同じく、間口の照合機能が必要である。さら

に、リーダとタグの双方に電池が必要で、保守の手間が大きい。ただし、作業者の手は物品を取り出すだけであり、作業の追加はない。

(3) Passive RFID [14]

バーコードの代わりに Passive RFID をタグとして用いる方式である。この方式もバーコード方式と同様にタグの設置と作業者へのリーダの追加が必要である。間口の照合機能の追加が必要である。電波の到達距離が短いので、タグにリーダを接近させないとセンシングできない。そのため Active RFID 方式と比べて間違っただけの間口のタグを読む確率は低い。バーコード方式に比べてタグとリーダの位置関係への要求は厳しくないが、作業者への動作追加はある。

(4) 光電センサ方式 [15]

物品棚の各間口の対向面に光源と受光器を取り付け、物品の取り出しによって光が遮られるのをセンシングするもので、各間口へのセンサ設置工事が前述の3つの方式に比べて大規模になる。さらに受光器で検出した信号を間口の照合のために DPS に渡すための制御ボードが必要となる。DPS への照合機能追加は必要である。作業者の手は間口から物品を取り出すだけであり、センシングのための追加動作はない。ただし、手や物品の動きによってはダブルカウントが起きる可能性がある。

(5) 重量検出方式 [16]

物品棚の各間口の底面にロードセルなどの重量センサを設ける方式である。間口に入っている物品の重量を計測するため物品の個数を含めて計測可能であり、作業ミスの検出精度は高い。この方式も間口を照合するための制御ボードや DPS への機能追加が必要である。作業者の手は間口から物品を取り出すだけであり、動作追加はない。

(6) 手を追跡する方式 (本研究で提案している方式)

光学的に手が間口に入ったことをセンシングする方式であり、物品棚への追加工事は発生しない。DPS の標識ランプの点滅を光学的に検出し、そのランプに対応した間口に手が入ったことをセンシングするので、DPS での間口照合は不要である。ただし、手が入ったことを検出するシステムには間口の照合機能は必要である。作業者の手は間口から物品を取り出すだけであり、センシングのための負担は増えない。ただし、後述するように手の追跡に色認識を使う場合には、そのための色をした作業グローブが必要となる。作業ミスの検出精度については、検証の必要がある。

4. MS-Kinect 利用システムの構成

4.1 基本構成

手の動きを検知する方法には、手の色の追跡によるもの

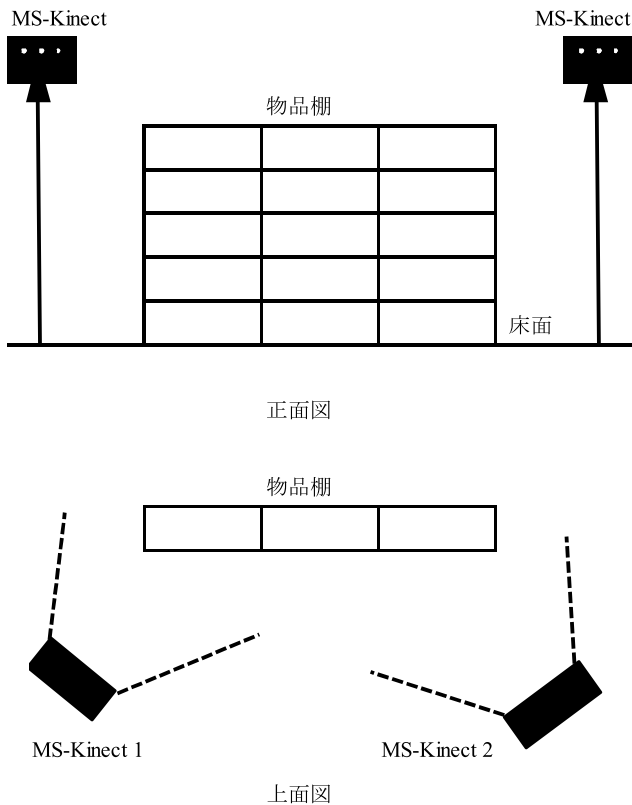


図 1 実験システムの構成
Fig. 1 Experiment system configuration.

と手の形の追跡によるものがある。前者は手の色を判別し、深度センサの情報を用いて手の位置や形を追跡している [17]。後者は、Microsoft Kinect for Windows (以下は MS-Kinect) が提供するスケルトン検出機能を利用して人物の姿勢を検出し、そこから身体の各部の動きを追跡するものである [18]。スケルトン検出機能は、作業者の全身像を正面からとらえているときに追跡の精度が最も高い。ピッキング作業では台車などが障害になって身体の一部が遮られること、作業者の正面には物品棚があるため MS-Kinect の設置が困難なことなどの制約条件があり、スケルトン検出機能の適用は困難と考えた。先に述べた色追跡の方式は、MS-Kinect を作業者の側面あるいは背面に設置しても手の動きを検知できると考え、提案システムに適用することにした。

本研究では、手が間口に入ったか否かを検出する必要があることから、追跡した手の位置情報が必要となる。その情報を得るためには深度センサを用いるのが効果的である。2章で紹介した深度カメラの1つである Leap motion controller では検知範囲が狭すぎる。以上のことから、本研究では MS-Kinect を利用する [19], [20]。作業者の身体やカートが MS-Kinect の視界を遮ると部品を取り出す手を追跡できない。極力死角を減らすために2台の MS-Kinect を左右から棚を眺める位置に設置する。これらの Kinect を1台の PC で制御する (図 1)。

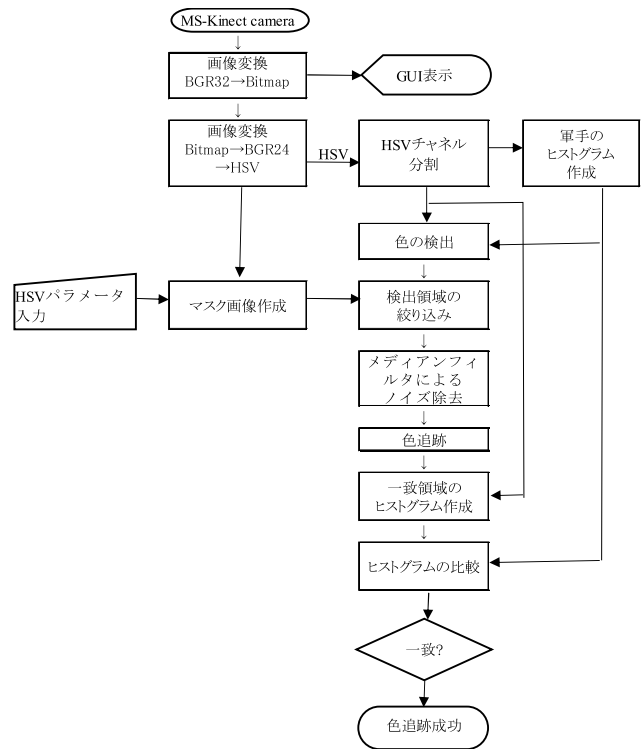


図 2 作業グローブの色追跡処理
Fig. 2 Flowchart for the color trace of work groves.

本システムには以下の機能が必要である。

- MS-Kinect のカラーカメラで得た画像情報の中から指定した色を抽出し、その位置を求めることにより手の動きを追跡する。
- 深度センサによって手が間口に入ったことを検出する。
- 間口に手が入った際に一瞬手を見失うことによるダブルカウントなどの誤検出を回避する。

4.2 手の追跡

物品を取り出す手の検出と追跡には、作業者の手にはめた作業グローブの色を利用する。作業グローブは、物品や棚の周囲環境に含まれない色を選ぶとともに、照明による認識率の低下が少ない色とする。色の選定についての詳細は、4.5 節に示す。

作業グローブの動きを追跡するための事前手順として、作業グローブを棚の間口の開口面に置き、MS-Kinect に接続した PC 画面上の画像に対し作業グローブの領域を指示することにより、作業グローブの色の登録を行う。次に、HSV 色空間の彩度 (S) と明度 (V) のパラメータを調整し、作業グローブの色のみを抽出するマスクを作成する。

その後の色の追跡は、図 2 に示すフローに従って OpenCV の機能により画像信号を処理する。MS-Kinect のカラーカメラ画像情報を色相 (H)、彩度 (S)、明度 (V) の成分に分割し、CalcBackProject 関数でヒストグラムのバックプロジェクションを求め、色を検出する。次いで作業グローブのマスク画像を用いて検出領域を絞り込み、cvCamShift

関数を用いて、作業グローブの色のヒストグラムと一致する場所の座標と領域の情報を得る。

カラーカメラの画像データには一般的にノイズが含まれることがある。ノイズの色は不定であり、使用している作業グローブの色と近いノイズが混入することがある。そのようなノイズが検知対象としている間口の領域の中に発生すると、該当する間口から部品を取り出したと誤検知をしてしまう可能性がある。この対策として、画像全体に対するメディアンフィルタを使った平滑化処理を採用した。画像の平滑化は、ぼかし処理とも呼ばれ、ノイズを除去するために使われる手法である。平滑化の手法はいくつかあるが、本システムでは、周辺から大きく孤立した画素（ショットノイズ）が多い画像に強いとされているメディアン平滑化を採用した [21]。具体的には、対象画素の周囲にある 8 画素を昇順、あるいは降順にソートし、中央の値（平均値ではない）を新しい画素値とするメディアン平滑化を行った。MS-Kinect に映る作業グローブの画像が小さいときにメディアン平滑化によって作業グローブの色がつぶされないように、メディアン平滑化に使用する範囲は最小に選んだ。そのため、サイズの大きいノイズは除去できない。

さらに、OpenCV の cvCamShift 関数による色追跡において、誤った結果が出力される場合があるため、検出された箇所のヒストグラムと、あらかじめ登録した作業グローブの色のヒストグラムを比較する手順を設けることで色追跡の精度を高めている。

本システムの適用現場は、配送センターや自動車組立工場などが想定される。これらの建物には窓はほとんどないため、直射日光の影響は受けないと考えられる。

4.3 手を入れた間口の検出

棚の間口に手を入れたことを検出するために MS-Kinect の深度カメラを利用して、Depth センサ面から手（作業グローブの色）までの距離を求める。図 3 に示すように、事前に PC 画面で見える部品棚の各間口の四隅を順次マウスでクリックして、開口面（ゆがんだ四角形に見えている）の頂点の座標を登録する。この座標を用いてカラーカメラの画素に対応する点から MS-Kinect の Depth センサ面までの距離を、深度カメラの距離情報によって記録する。次に、色の追跡によって求めた作業グローブの領域から Depth センサ面までの距離を求める。この値が事前に登録した開口の四隅から Depth センサ面までの距離の範囲に入っていた場合、手が間口に入ったと認識する。

なお、カラーカメラと深度カメラは設置位置が異なるため、カラーカメラの座標（ColorFrame 座標）と深度カメラの座標（DepthFrame 座標）とは同じ地点を示さない。そのため ColorFrame 座標と DepthFrame 座標の対応をとる必要がある。ColorFrame 座標はカメラの画素に対応した 2 次元配列であり、DepthFrame 座標は画素に対応す

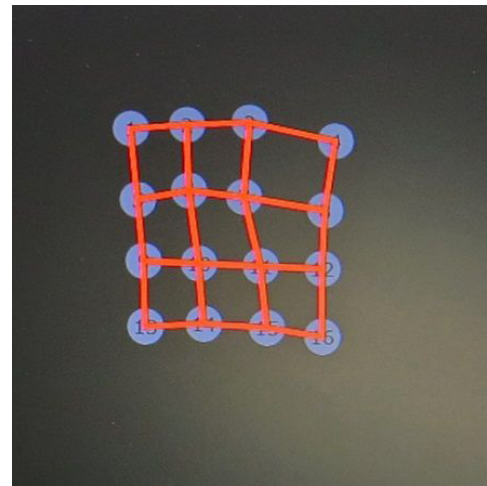


図 3 間口の登録画面

Fig. 3 Slot corner record on PC display.

る距離を mm 単位の数値で示す 1 次元配列である。これら 2 つの座標系は MapColorFrameToDepthFrame を用いて対応させる。これにより ColorFrame 座標に対応する DepthImagePoint の距離情報が取得でき、カラーカメラの画素に対応する点と Kinect との距離を正しく求めることができる。

4.4 ダブルカウントの防止策

画像ノイズの発生や作業グローブの動きによっては、同じ間口に二度手を入れたと誤認識（ダブルカウント）する可能性がある。以下の 3 点は、その対策である。

(1) 位置の連続性による判断

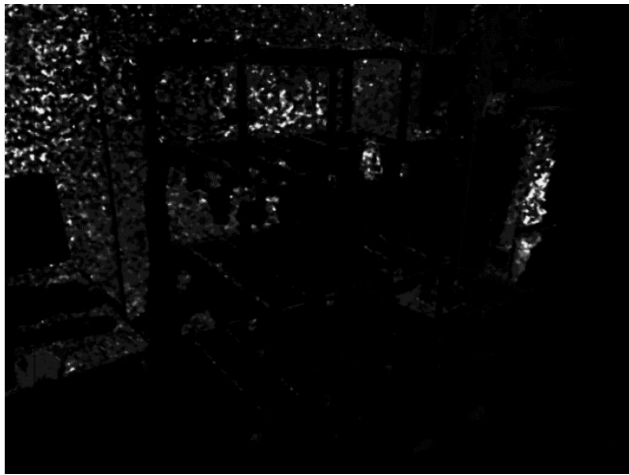
4.2 節で述べた画像にノイズが発生する位置は不定であるが、同一の場所で何度も連続して発生することは稀である。このことから、同一の場所である一定の回数分、連続して作業グローブの色を検知しなければ、部品を取り出したとは見なさないことにした。後述の評価実験では、判定回数を 5 回としている。

(2) 時間間隔による判断

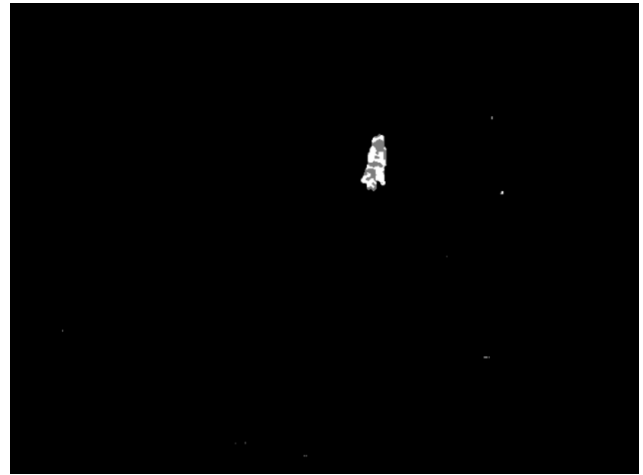
上記の処理を施しても、時として同一の場所に短時間に繰り返しノイズが発生することがある。この対策として、間口の領域内でノイズを作業グローブと検知しても、前回の部品取り出しから一定時間が経過していない場合は、部品の取り出しとは見なさないこととする。後述の評価実験では、判定時間を 0.25 秒としている。

(3) 再認識時の対策

今回の作業グローブの色を認識する方法では、図 4 に示すような容器 (container) に部品を入れる場合、カメラが一瞬作業グローブを見失った後、再び作業グローブを認識する可能性が高い。これがダブルカウントにならないように、一定時間内に作業グローブを同じ場所で再認識した場合には、それをカウントしないアルゴリズム



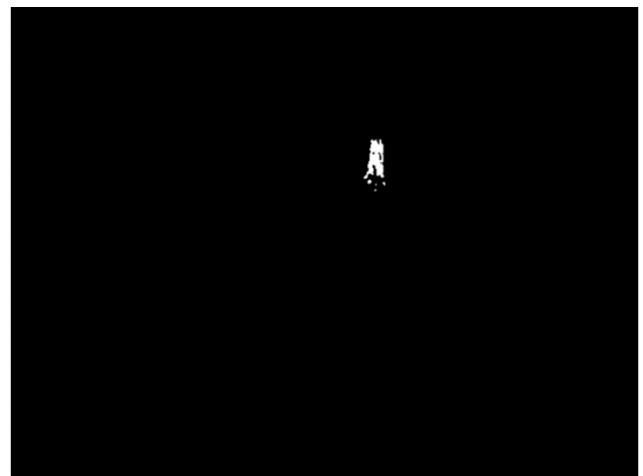
(a) 白の軍手 (軍手を明確に識別できず)
(a) White grove



(c) オレンジの軍手 (隣の信号機を誤検出)
(c) Orange grove



(b) 青の軍手 (棚と軍手が区別できず)
(b) Blue grove



(d) 黄緑の軍手 (軍手のみを正しく検出)
(d) Yellow-green grove

図 4 軍手の色に対するマスク処理結果

Fig. 4 Masked images for different color groves.

を導入した。後述の評価実験では、0.75 秒としている。

4.5 作業グローブの色の選択

色追跡を行う作業グローブは、模様や光沢がなく単色のものが好ましいと考えられるため、アクリル素材の軍手を採用した。「白、黒、青、緑、黄緑、黄、赤、オレンジ、ピンク」の9種類の色の軍手のなかから最も検知率が高く、また誤検知率の低いものを選択することにした。

軍手の色を変えてマスク処理を行った画像について説明する。白、黒、緑の場合、図 4(a) に示すように軍手だけを抽出することができなかった。青では、図 4(b) に示すように部品入れの箱が同色であったため、箱と軍手を区別できなかった。ピンクの場合は背景の壁を誤検知することがあった。オレンジ、黄、ピンクは棚の右隣にある実験用信号機の一部を図 4(c) のように誤検知した。黄緑と赤では、図 4(d) のように軍手だけを抽出できた。以後の実験

表 2 軍手の色に対する検出結果の違い

Table 2 Detection results for nine color groves.

軍手の色	軍手のみを検出	周囲の色の誤検出	実験に使用
白	不可能	—	
黒	不可能	—	
青	可能	大	
緑	不可能	—	
黄緑	可能	なし	可能
黄	不可能	小	可能
オレンジ	不可能	小	可能
赤	可能	なし	可能
ピンク	不可能	大	

では表 2 にまとめたとおり、軍手のみを検出できた黄緑、赤と周囲の色の誤検出が比較的少なかった黄、オレンジの4色は使用できると考えている。

5. 実験室環境でのピッキング実験と計測

5.1 評価環境と計測方法

プロトタイプシステムの性能確認のために、実験室で予備評価実験を行った。部品棚の9個の間口に物品箱を置き、それぞれに物品として10個のペットボトルを入れる。各間口からペットボトルを1つずつ取り出すことを10回繰り返す。部品棚の大きさは、幅1.2m×高さ1.6m×奥行き0.8mで、間口は、幅360mm×高さ460mmである(図5)。被験者は全員学生で、ピッキング作業の経験はない。

MS-Kinectは、作業者の身体に遮られずに手が間口に入ることが見えやすく、すべての間口で手をできるだけ大きく撮れる位置を選んで設置した。具体的には棚の側面から1m離れ、棚の前面からは1.3mの位置である。MS-Kinectの床面からの設置高は、作業者の身長に対して最適値が存在すると考え、高さを変えて測定する。

部品棚の各間口に対する物品取り出し検知数と誤検知数の実験結果を図6のように整理する。2台のMS-Kinect

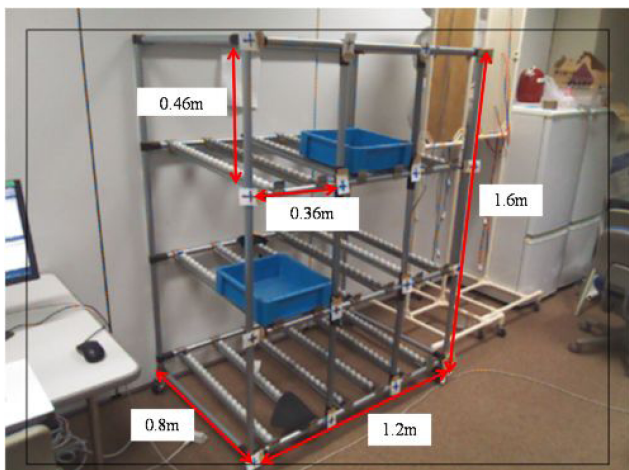


図5 実験に用いた部品棚
Fig. 5 Parts rack for the experiment.

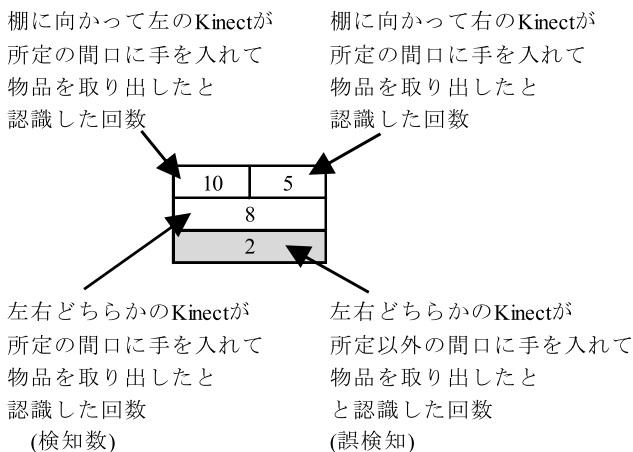


図6 実験結果の表記
Fig. 6 Experiment data table format.

から得た画像情報は、PCでそれぞれ独立に処理し、間口に手を入れて物品を取り出したと認識した回数を図6の上段左右に示す。次に、2台の認識結果の論理和を求め、その結果に両者が検出した間口が同一であるかの判断を加えて、図6の中段に検知数として示す。図6の下段には誤検知数で、指定された間口とは違うところから物品を取り出したと検知した回数を示す。

1人の被験者が黄色の軍手をつけ、MS-Kinectの設置高を1.9mとしたときの実験結果を図7に示す。上段中央間口のデータに着目すると、左右のKinectの検知数はそれぞれ9であるにもかかわらず、検知数は11となっている。これは、いずれかのMS-Kinectがダブルカウントを1回したためである。また、中段右間口では、検知数が10、誤検知数が1となっている。これは、10個の部品の取り出しすべてについて左右いずれかのMS-Kinectは該当する間口から物品を取り出したと認識しているが、別のKinectが1回別の間口を認識してしまったことを意味している。上段左や上段右など検知数が9となった間口については、被験者の手が身体の影になって、MS-Kinectが検知し損ねたことが原因である。また、下段右の間口では被験者がしゃがむ姿勢をとったため、軍手を見失うなどして手の動きを検知できなかったことが検知ミスにつながっている。

5.2 MS-Kinectの設置高による影響

MS-Kinectの設置高の適正領域を求めるため、4つの設置高で物品の取り出し実験を行った。被験者の身長は1.76mである。設置高は、下記のように選定した：

- 1.2m：棚の高さより若干低い位置。
- 1.6m：棚の高さと同じ。
- 1.9m：棚の高さより若干高い。
- 1.8m：1.9mは高すぎるとの意見があり、追加設定。

実験に利用した軍手は、4.5節で述べたとおり黄緑を使用した。実験結果を表3に示す。数値は9個の間口に対して各10回取り出しを行った際の検知数の平均値である。

6	9	9	9	9	5
9		11		9	
1		0		1	
7	9	7	4	9	4
9		9		10	
0		0		1	
4	10	10	8	9	4
10		10		9	
0		0		0	

図7 実験結果(軍手：黄色)
Fig. 7 Experiment data for yellow grove.

表 3 Kinect の設置高に対する物品取り出しの検知数および誤検知数

Table 3 Numbers of detections and errors vs MS-Kinect elevations.

Kinect設置高	検知回数	誤検知回数
1.2m	9.44	0
1.6m	9.89	0
1.8m	9.78	0
1.9m	9.89	0.33

表 4 検知数 (9 間口の平均値)

Table 4 Numbers of detections.

Kinect高 (m)	軍手の色			
	黄緑	黄	赤	オレンジ
1.6	10	9.7	9.6	9.9
1.8	9.9	9.4	10	10.1
1.9	10	9.6	9.4	9.6

表 5 誤検知数 (9 間口の平均値)

Table 5 Numbers of errors.

Kinect高 (m)	軍手の色			
	黄緑	黄	赤	オレンジ
1.6	0	0	0.11	0.22
1.8	0.2	0.67	0	0.22
1.9	0.3	0.33	0.22	0.33

設置高 1.6 m と 1.8 m が良好であることが分かる。

1.2 m では、誤検知は起きていないが、間口が被験者の陰になりやすいために検知率が低下している。この高さでは、被験者の身長によらず検知性能が劣ると考えられることから、以降の複数の被験者による性能評価には不採用とした。1.9 m については、誤検知率が高くなっているが、被験者の身長に依存する可能性があることから、以降の性能評価においても採用することにした。

軍手の色と Kinect の設置高をパラメータとして検知数と誤検知数をまとめた実験結果を表 4 と表 5 に示す。検知数は 9 個の間口の検知数 (図 6 の中段) を平均した値で、誤検知回数は誤検知数 (図 6 の下段) を 9 個の間口で平均したものである。結果に大差はないが、検知数については黄緑が最も高く、次が赤という結果になった。誤検知については、赤が最も低く、次いで黄緑であった。検知数を高くとることを優先し、以後の実験では黄緑を使用した。なお、MS-Kinect の設置高については、身長 1.76 m の被験者に対しては 1.6 m と 1.8 m が良好な結果であった。

5.3 実験室環境での評価実験 1 (作業動作を指定しなかった場合)

6 人の被験者による部品の取り出し実験を行った。黄

表 6 部品取り出し検知数と誤検知率 (動作を指示せず)

Table 6 Numbers of detections and errors before action guidance.

被験者	被験者の身長 (m)	Kinect設置高			
		1.6m		1.8m	
		検知数	誤検知率	検知数	誤検知率
A	1.74	9.2	0	8.8	0.44
B	1.7	10	0	9.9	0.33
C	1.62	9.8	0.11	9.8	0.11
D	1.75	10	0	9.9	0.11
E	1.66	9.6	0.22	9.7	1.78
F	1.69	10.4	0	10	0.44
平均	1.71	9.83	0.055	9.68	0.54

緑の軍手を使用し、MS-Kinect の設置高は 1.6 m, 1.8 m, 1.9 m の 3 段階でデータを収集した。各間口での部品取り出し回数は 10 回である。設置高 1.8 m と 1.9 m の結果はほぼ同じであったため、1.6 m と 1.8 m の各被験者の取り出し検知数と誤検知率を表 6 に示す。各値は、9 個の間口のデータの平均である。

本実験では、間口から部品を取り出す際の動作について指示しなかったことから、被験者による検知数、誤検知数のばらつきが大きかった。被験者 A は、棚の前で左右に足を動かさず、間口の位置に対して無理な姿勢で作業をしていた。そのため、MS-Kinect の画像では手が身体の陰になることが多く、検知回数が低くなった。また、手が他の間口の前を通過することが多かったことから、誤検知率も高くなった。被験者 B, C, D は、適正な動作速度で間口の正面から部品を取り出したため、検知数は高く、誤検知数が低かった。被験者 E は、部品を取り出した後、他の間口の直前を通るように手を移動させることが多かったため、他の間口を誤検出する頻度が高かった。被験者 F は、部品を取り出す動作が他の被験者よりも遅く、部品を取り出す動作がダブルカウントにつながっていた。

5.4 実験室環境での評価実験 2 (作業動作を指定した場合)

前節の実験データを基に、各被験者に下記の制約条件を伝え、前節と同様の実験を行った。

- 間口から部品を取り出す前に、該当する間口の正面に身体を動かす。
- 間口から部品を取り出す際は、遅すぎない速度で手を入れ部品を取り出す。
- 間口から部品を取り出した後は、間口の開口面に対して垂直方向に手を動かし、部品を置く。

実験結果を表 7 に示す。被験者 G 以外は、非常に高い精度で部品取り出しを検知できたうえ、誤検知率も低かった。被験者 G は、実験が進むにつれて制約条件を忘れ、制約から外れる動作をしていた。なお、誤検知については、MS-Kinect の設置高 1.8 m の方が 1.6 m よりも若干少ないという結果が得られた。今回の実験では、被験者の身長は

表 7 部品取り出し検知数と誤検知率 (動作指示あり)

Table 7 Numbers of detections and errors after action guidance.

被験者	被験者の身長 (m)	Kinect設置高			
		1.6m		1.8m	
		検知数	誤検知率	検知数	誤検知率
A	1.74	10	0	10	0.11
F	1.7	9.9	0	10.1	0.33
G	1.62	9.9	0.11	9.6	0.44
H	1.75	10	0	9.9	0
I	1.66	10.1	0	10	0
平均	1.69	9.98	0.022	9.92	0.176
Gを除く平均	1.71	10	0	10	0.11

1.6m から 1.8m の間であったが、MS-Kinect 設置高と身長との間に大きな相関は見られなかった。

6. ピッキング検知システムの評価実験と結果の分析

6.1 自動車組立工場における評価実験

6.1.1 実験の目的と実験環境

提案システムの動作検証を実環境で行うことを目的として、自動車組立工場での評価実験を行った。

トヨタ自動車東日本株式会社の岩手工場にある車体組立ラインに実験機器を設置した。ラインの作業には通常の作業用軍手の代わりに黄緑色の軍手を着用してもらい、実際のピッキング作業を行う過程で、手の動きが認識できるかを評価した。作業場の照明、部品トレイや部品棚などは、通常の作業環境そのものであり、ピッキングする物品は実際の自動車部品である。MS-Kinect や PC を設置した点と、実験用の軍手を装着して作業したことだけが本実験のための変更点である。機材の設置後の予備実験で、黄緑であれば周囲の棚や部品の色と区別でき、手の動きが認識できることを確認した。

図 8 に台車の通路と部品棚の位置関係を示す (上から見た図)。部品棚は通路の両側に置かれ、作業者は部品トレイを載せた台車を押しながら進行方向右側の部品棚 1→2→3→4 の順でピッキングを行っていく。ランプの点灯している間口から部品を取り出し、ランプを消してから取り出した部品を部品トレイに入れる。これを繰り返して片側の部品棚からピッキングを終えた作業者は、台車の反対側に回り、これまでとは逆方向に台車を移動させながら、右側の部品棚 5→6→7 の順でピッキングを続ける。出発点に戻った時点で、ピッキング工程が完了となる。今回の検知システム実験は棚 7 を対象とした。Kinect は棚 7 の対向面にある棚 1 と 2 の間の支柱および棚 2 と 3 の間の支柱に沿わせて、高さ約 1.6m の位置に設置した。設置位置は台車や作業者の移動を妨げないことと、実験対象の棚が Kinect の視界に入る位置であることから決定した。

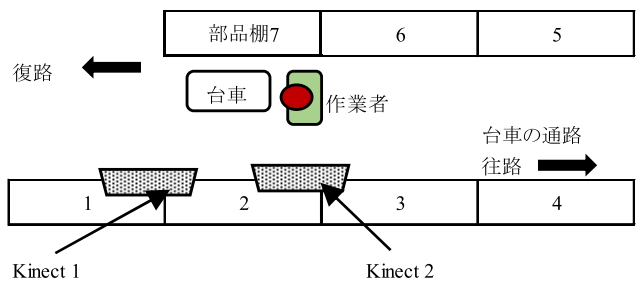


図 8 自動車組立工場での実験環境 (上面図)

Fig. 8 Experimental setup at the automotive assembly plant (top view).

A1	B1	C1
A2	B2	C2
A3	B3	C3
A4	B4	C4

図 9 部品棚 7 の間口 (正面図)

Fig. 9 Parts slots of the rack 7.

図 9 に検証実験の対象にした棚 7 の間口の配列を示す。間口が縦に 4 個、横に 3 個ある。実験システムは縦横各 3 個の間口まで検知可能であるが、今回の設置環境では Kinect と棚との距離が十分に確保できず、横方向に間口 3 個分を見渡すことができなかつたため、横方向を 2 個分に限って間口 A1 から A3 と間口 B1 から B3 を検知実験の対象とした。図で網掛けした間口が実験対象である。実験中は部品を取り出す間口を指示するランプの点灯状況や作業者の動作を観察し、MS-Kinect と PC でカウントした結果との照合を行った。

ピッキング工程の商用ラインで商用部品と棚を使っての検証実験であるため、実験室で行ったようにすべての間口から等しい回数で部品を取り出すような評価はできなかった。限られた時間内では、試行回数が制限されること、ピッキングの対象にならない間口が実験対象に含まれたことなどから定量評価に十分なデータ収集はできなかった。

6.1.2 実験結果

被験者は実ラインでのピッキング作業を日々行っている方で、基本的に作業ミスはしない。この実験でも、ピッキング作業にミスはなかった。表 8 に実験結果の集計を示す。上段の「検知すべき数」は、ランプが点灯した間口から実際に部品を取り出した回数で、下段は試作システムが自動検知した回数である。

実験は工程の切れ目を挟んで各 3 回繰り返し合計 6 回実施した。C1 から C3 の間口は実験対象外であり、部品の取り出しは認識していないが、隣接する B の間口との誤検出を観測するために、データを記録した。

3 つの間口で生じた誤検出について、目視で確認した作業者の動作の情報も加味して分析を行った。

表 8 自動車工場での実験結果の集計

Table 8 Experimental results at the automotive assembly plant.

間口	A1	B1	C1
検知すべき数	7	1	0
検知数	8	2	0
間口	A2	B2	C2
検知すべき数	5	4	0
検知数	5	4	0
間口	A3	B3	C3
検知すべき数	6	5	0
検知数	6	6	0

- 要因 1：間口 A1 で発生した誤検出は、部品を覆っているトレイのカバーを右手で持ち上げる動作を認識した後、実際に部品を取り出す動作を認識したことによるダブルカウントであった。
- 要因 2：間口 B3 での誤検出は、部品を取り出す動作を認識した後、部品トレイが空になった際に取り出す「カンバン」と呼ばれる伝票 [22], [23] を同じ間口から取り出す動作を認識したもので、これもダブルカウントになった。
- 要因 3：間口 B1 での誤検出は、上記の要因とはまったく異なる現象であった。作業者が右手を間口 A1 に向けて移動させる際に、手の動きが棚に平行になり、間口 B1 の直前を右手が横切る形になったときに、この棚から部品を取り出したと誤って認識したものである。

6.1.3 実験結果に対する考察

工場での実験は、稼働している生産ラインを利用して実施したことから、時間的制約があり 6 回で終了した。軍手の色など、設置時に確認した部分については、実験中も問題なく動作することが確認された。今回は、5.4 節で述べたような作業動作については作業者に伝えず、通常の作業動作の中での検知状況を調査した。取り出しの際の動作を改善すれば、ランプが点灯していない間口から誤って部品を取り出したと認識するような誤検出は大幅に減ると考えている。

商用ラインで発生した誤検出の要因について考察した結果を以下にまとめる。

要因 1 および 2 は部品以外の品物に触れるなど、部品の取り出しに類似した手の動きが 2 回以上起きることがあることを予備実験では考慮していなかったため、ダブルカウントを防ぐ仕掛けが用意できていなかった。Photo interrupter などの光電センサ方式（光路を手や部品が遮ったことで動きを検出）の場合もこの種の手の動きはダブルカウントにつながるため、画像認識方式に特有の問題とはいえない。この点は、製造ラインや棚ごとに違いのある作業者の動きを盛り込んだ検出のアルゴリズムを追加するこ

表 9 黄緑の軍手による実験結果

Table 9 Experimental results for yellow-green groves.

間口	A1	B1	C1
検知すべき数	4	4	4
検知数	4	5	4
間口	A2	B2	C2
検知すべき数	4	4	4
検知数	4	4	4
間口	A3	B3	C3
検知すべき数	4	4	4
検知数	4	4	5

とで回避できると考えられる。

要因 3 は、予備実験でも確認していたように、他の間口を横切るような棚に平行な方向には右手を動かさないように作業者に指示することで回避できると思われる。

なお、誤検出が起きた場面でもあらかじめ登録した軍手の色のヒストグラムと、システムが追跡結果として出力した領域のヒストグラムが一致していることを確認している。したがって、誤検出の原因は色検出の問題ではなく、作業者の動作を指定しなかったことにより検知ミスが発生したと考えられる。

この実験から、既存の DPS には何ら変更を加えず、本システムに標識ランプの位置を識別する機能を追加するだけで、物品を誤った間口から取り出した可能性があることを認識したら、作業者に注意を促すことが可能になることが確認できた。

6.2 DPS 評価設備での実験

6.2.1 実験の目的と実験環境

自動車組立工場などで広く使われている DPS では、棚の間口にランプを設けて物品を取り出すべき間口を表示している。このシステムを提供している企業（アイオイ・システム）の評価設備においてデータ収集を行った。物品棚とデモ用の物品は評価設備に備えつけの機材を借用した。棚は床からの高さ 1.58m、横幅 1.2m であり、間口は 3×3 で間口の幅は 380mm、高さは 310mm であった。最下段の間口の下縁は床から 460mm ほど離れた位置にある。ピッキング実験に用いた物品は 200×200×150mm ほどの紙箱で、側面に色紙が貼ってある。持ち込んだ MS-Kinect は対向する物品棚の支柱を利用して 1.8m の高さに設置した。この実験では 3×3 の間口すべてを対象にした。評価設備はショールームを兼ねた環境であり、蛍光灯による室内の照明は自動車工場よりも明るく、色の判別が容易であった。

6.2.2 実験結果と分析

当初はこれまで実績の豊富な黄緑の軍手でピッキング実験を行った。結果を表 9 に示す。実験をお願いした評価



図 10 ピッキングシステム評価設備での実験風景

Fig. 10 Experimental setup at the digital picking system evaluation room.

表 10 オレンジの軍手による実験結果

Table 10 Experimental results for orange groves.

間口	A1	B1	C1
検知すべき数	3	4	3
検知数	3	5	3
間口	A2	B2	C2
検知すべき数	2	4	3
検知数	2	4	3
間口	A3	B3	C3
検知すべき数	3	3	3
検知数	2	2	4

担当者が軍手の色の選定自由度について深い関心を示されたため、軍手をオレンジに変えて実験を行った。対象色の変更は、現地でフィルタのパラメータを最適化することで対応した (図 10)。オレンジの軍手に対する実験結果を表 10 に示す。ダブルカウントが間口 B1 と C3 で各 1 回発生し、間口 A3 と B3 では検知ミスが起きた。ダブルカウントは被験者の手が棚の開口面に平行に動いたことによる。また、評価設備の設置場所の都合で、Kinect 1 の視界が被験者の身体で遮られることが多く、大半の判定を Kinect 2 に依存する結果になったことが検知ミスの要因と考えられ

る。これらの要因は黄緑の軍手での実験でも同様に存在したので、軍手の色を変えたことが要因ではない。むしろ、現地の状況に合わせて適切な軍手の色を選択することで、柔軟に対応できるシステムであることが立証できたといえる。この実験でも軍手の色のヒストグラムとシステムが出力した色の領域のそれが一致していたことから、検知ミスの要因は作業者の動作に起因するものである。なお、この実験の被験者はピッキングシステムの評価担当者であり、ピッキング作業の経験がある。そのため、作業ミスは発生しなかった。

7. まとめ

色つきの軍手と MS-Kinect を利用したピッキング工程における作業ミス検知システムを提案した。プロトタイプシステムを作成し、軍手の色や物品棚から物品を取り出す際の動作など、実験室で条件の最適化を行った。そこでは、非常に良好な検出結果が得られた。これらをふまえて、商用稼働している自動車組立工場のラインおよび DPS を開発している企業の評価設備において実証実験を実施した。作業者の動作に注文をつけずにデータ取得を行ったことから、物品棚の間口に平行に手を動かす動作による誤検知が発生していたが、作業動作を見直せば誤検知の問題はほぼ解決すると考える。

既存の DPS には何ら変更を加えず、本システムに標識ランプの位置を識別する機能を追加するだけで、物品を誤った間口から取り出した可能性があることを認識したら、作業者に注意を促すことが可能になることが確認できた。

本研究は、物流事業における配送センタや各種組立工場におけるオフラインピッキングなど、非常に幅広く適用が可能である。Amazon などに見られる自動倉庫 [24], [25] や物品配送ロボットなどのシステムにおいても、最終的に物品を棚から取り出す作業は機械化されず、作業者にゆだねられていることから、作業ミス検知システムは有用である。今後、さらに広い応用が期待できるものと考えている。

謝辞 実験環境を提供いただき、ピッキング工程に関する情報をいただいたトヨタ自動車東日本株式会社の鈴木潤主任、株式会社アイオイ・システムの吉川孝道取締役様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Henn, S. et al.: Metaheuristics for the Order Batching Problem in Manual Order Picking Systems, Working Paper 20/2009, Fac. of Economics and Management, Otto-von-Guericke-University Magdeburg, 1-2 (1990).
- [2] 熊澤光正: トヨタ生産方式大全第 2 版, pp.96-97, 大学教育出版 (2015).
- [3] 青木幹晴: 自動車工場のすべて, p.76, ダイアモンド社 (2012).
- [4] available from <http://www.hello-aioi.com/product/1-pick/lightmodule.html>.

- [5] available from (http://www.inventoryops.com/order_picking.htm).
- [6] Schwerdtfeger, B. and Klinker, G.: Supporting Order Picking with Augmented Reality, *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2008* (2008).
- [7] 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，第 18 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，pp.196-199 (2013).
- [8] Baumann, H. et al.: Evaluation of Graphical User-Interfaces for Order Picking Using Head-Mounted Displays, *13th International Conference on Multimodal Interaction ICMI'11* (2011).
- [9] Ali, S. et al.: A SOA based Context-Aware Order Picking System for Warehouses using Laser Range Finder and Wearable Computer, *IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM2011)*, pp.1-8 (2011).
- [10] 佐藤永欣ほか：地磁気・加速度センサによる自動車組立工場内作業トレースシステム，情報処理学会論文誌，Vol.51, No.3, pp.810-823 (2010).
- [11] available from (<https://www.leapmotion.com/?lang=jp>).
- [12] 鈴木 準：物流バーコードの現状と展望，日本物流学会誌，1995.4, pp.45-54 (1995).
- [13] ヤンハー：ロジスティックスにおける非接触自動認識技術の応用と実用化，日本経営診断学会全国大会予稿集 8.0, pp.124-127 (2008).
- [14] 伊津見一彦ほか：作業分析に基づく服飾雑貨流通加工の生産性向上に関する研究，日本経営工学会論文誌，Vol.64, No.2, pp.169-176 (2013).
- [15] 曾賀野健一ほか：映像の動作解析技術を用いた「ボカよけ」手法の研究開発—梱包作業への適用，岐阜県情報技術研究所研究報告，No.12, pp.13-18 (2009).
- [16] available from (<http://www.teraokaseiko.com/jp/products/PRD00209/>).
- [17] Oikonomidis, I. et al.: Efficient model-based 3D tracking of hand articulations using Kinect, *BMVC*, Vol.1, No.2, p.3 (2011).
- [18] Obdrzalek, S. et al.: Accuracy and robustness of Kinect pose estimation in the context of coaching of elderly population, *Engineering in medicine and biology society (EMBC), 2012 annual international conference of the IEEE, IEEE* (2012).
- [19] available from (<https://www.microsoft.com/en-us/Kinectforwindows/>).
- [20] 桑畑舜也ほか：情報構造化環境における家具上物品検出のための移動ロボットによる視覚記憶照合と変化検出，第 31 回日本ロボット学会学術講演会 (2013).
- [21] Bradski, G. and Kaehler, A.: 詳解 OpenCV, p.115, O'Reilly Japan (2009).
- [22] 富野貴弘：日産生産方式と受注生産—トヨタとの比較を通じて，東京大学ものづくり経営研究センタ MMRC Discussion Paper Series No.295 (2010).
- [23] Arbulu, R. et al.: Kanban in Construction, Proceedings of IGLC-11, Virginia, USA 2003, The International Group for Lean Construction.
- [24] Bailey, B.: Amazon's new robot army is ready to ship, Dec. 1 (2014), available from (<http://bigstory.ap.org/article/440d75555d74964a11c3700710758f3/amazons-new-robot-army-ready-ship>).
- [25] Wohlsen, M.: Amazon Reveals the Robots at the Heart of Its Epic Cyber Monday Operation, Dec. 1 (2014), available from (<http://www.wired.com/2014/12/amazon-reveals-robots-heart-epic-cyber-monday-operation/>).



宇田 吉広 (正会員)

『高速光ファイバデータリンクの開発・実用化』でオーム技術賞を受賞。

1976 年名古屋大学大学院修士課程修了（電気系）。同年 NEC 入社。2015 年まで同社で光通信技術の研究開発に従事。現在，岩手県立大学大学院博士後期課程に所属。IEEE Senior Member，電子情報通信学会会員。1988 年



吉田 和広

2014 年慶応義塾大学法学部卒業。現在，岩手県立大学，株式会社 AVALON にシステムエンジニアとして勤務。



村田 嘉利 (正会員)

システムの情報化，医療・健康管理の情報化を中心に研究開発。

1979 年 3 月名古屋大学大学院電気工学専攻修了，同年 4 月 NTT 入社。2006 年 7 月岩手県立大学ソフトウェア情報学部教授，博士（工学）（静岡大学）。IEEE，電子情報通信学会，IT ヘルスケア学会各会員。自動車および交通シ