

距離画像センサを用いた作業動作解析技術の研究

ー再帰性反射マーカによる組立作業の分析ー

渡辺 博己

浅井 博次

生駒 晃大

棚橋 英樹

A Study on Working Motion Analysis Technology Using Depth Sensor

- Operations Analysis System for an Assembly Work by Both Hands with Retroreflective Markers -

Hiroki WATANABE

Hirotsugu ASAI

Akihiro IKOMA

Hideki TANAHASHI

あらまし カイゼン活動における作業時間計測を支援するために、距離画像センサを用いた作業動作解析技術の開発を目指している。本研究では、両手首に装着した再帰性反射マーカを検出することにより作業時間の計測が可能な作業分析システムを開発した。実験室環境において組立作業を模した実験を行い、システムの動作を検証した結果、計測した作業時間から複数のグラフを作成し、作業時間の推移が容易に把握できることを確認した。また、時間分解能を検証した結果、約47.6ミリ秒間隔で時間計測が可能であることを確認した。

キーワード カイゼン、作業分析、距離画像センサ、再帰性反射マーカ、作業時間計測

1. はじめに

製造業の作業現場では、生産性向上のために積極的に作業カイゼンに取り組み、生産工程の効率化を図っている。作業カイゼンの手法には、IE (Industrial Engineering) ^[1]と呼ばれる工学的手法があるが、IE を用いた作業カイゼンにおいて、最初に取り組みなければならないのが現状分析である。カイゼン担当者は、ストップウォッチやビデオカメラを持って作業現場に張り付き、作業者の作業状況を観察し、作業を構成する各動作にどの程度の時間を要しているのかを調査する。しかし、この調査には、膨大な時間と手間を要するだけでなく、計測ノウハウを有する人材の育成が必要であり、これらに係る人件費等の問題から、現状分析に至る前にカイゼン活動が停滞することも少なくない^[2]。また、カイゼン活動を支援するシステム^[3,4]が市販されているが、撮影した動画を再生しながら動作を登録する必要があるため、多数の工程から構成され、完了するまでに時間を要する作業に対しては、効率的なカイゼン活動を行うことが困難である。

カイゼン活動支援を目的として、画像処理技術を用いたシステムも提案されている。板倉らは、家電製品の組立作業に従事する作業者の頭と両手にカラーマーカを装着し、マーカ軌跡データのパターンマッチングにより、定型作業と異なる作業の発見を行っている^[5]。高橋らは、基板検査装置の組立作業において、距離画像センサにより取得した人物領域特徴量から5つの姿勢に分類することを試みている^[6]。しかし、これらのシステムは、ムダな作業やムリな

姿勢の発見を目的としているため、動作単位の作業時間計測には適用することができない。

一方、作業時間計測が可能な作業分析システムも提案されている。熊谷は、安価な距離画像センサである Microsoft 社の Kinect を用いて、内蔵 API を利用することにより作業者の関節位置を計測し、動作単位の作業時間分析手法を提案している^[7]。しかし、Kinect の内蔵 API は、人物の正面から撮影した映像を対象として関節位置を推定するため、作業環境によっては、作業者の前方にセンサの設置場所を確保できない場合がある。また、我々は、俯瞰可能な位置に Kinect を設置することにより、距離画像による背景差分から人物領域を検出し、身体部位の形状特徴を抽出することにより、作業環境における両手位置を求め、動作の始点から終点までの移動時間を計測することにより、作業時間を計測するシステムを試作した^[8]。しかし、背景が変化する作業環境においては、人物領域の検出が困難となり、両手位置を正確に求められない等の課題があった。

そこで、本研究では、再帰性反射マーカを利用した作業環境の変動にロバストな作業分析システムを開発した。システムでは、マーカに再帰性反射材を使用することにより、Kinect の赤外線カメラ映像における高輝度領域として、容易に抽出することが可能である。また、抽出したマーカの位置情報から、動作の開始・終了を検出することにより、容易に作業時間を計測することが可能である。以下、開発したシステムの詳細について記述するとともに、実験室環境において、組立作業を模した実験を行ったので、その結果について報告する。

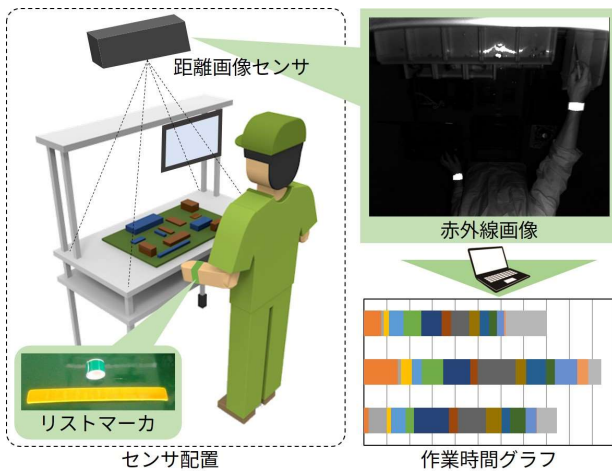


図1 提案システムの構成

2. 作業分析システム

2.1 システムの概要

図1に開発したシステムの構成を示す。本システムでは、作業台の作業面を俯瞰するように設置した Kinect を用いて、作業者の両手首に装着した再帰性反射マーカの位置と時刻を測定する。また、測定対象となる動作の始点、または終点を含むように、取得画像上でマーカを検出するための測定エリアを配置し、エリアの大きさ、及び通過順序等を予め設定しておく。

システムは、マーカの各測定エリアにおける通過時刻を分析し、通過時間差を動作時間として作業時間を計測する。分析処理は、マーカ候補領域抽出、マーカ領域左右判定、測定エリア通過判定から構成される。以下に、各処理についての詳細を述べる。

2.2 マーカ候補領域の抽出

マーカには、金属の薄板が中に入った巻き付け型のものを使用し、両手首用として色の異なる再帰性反射テープを貼付する。再帰性反射材からなるマーカに赤外光を照射し、その反射を赤外線カメラで撮影した場合、マーカ領域は、高輝度領域として取得することが可能である。Kinect には、距離画像を取得するための赤外線 LED と赤外線カメラが装備されており、本稿では、赤外線画像から高輝度領域を取得することにより、マーカ抽出処理のロバスト性を高めている。また、巻き付け型のマーカを手首に装着し、俯瞰撮影した場合、手首が回転してもほぼ同一の形状としてマーカを抽出することが可能である。

マーカ候補領域の抽出処理では、まず、取得した赤外線画像における高輝度領域が抽出されるよう2値化し、領域外周の輪郭を抽出する。次に、抽出した輪郭を直線近似して輪郭線を求め、輪郭線数が4となる凸四角形領域をマーカ候補領域として抽出する。図2に、本システムで取得したカラー画像、距離画像、赤外線画像、及びマーカ候補領域の抽出例を示す。

2.3 マーカ領域の左右判定

マーカ領域の左右判定では、マーカ候補領域の中心位置に対応するカラー画像の画素位置を求め、対応画素を中心とした領域色と、予め設定した各マーカの基準色を比較することにより判定する。



(a) カラー画像



(b) 距離画像



(c) 赤外線画像



(d) マーカ候補領域(赤枠)

図2 取得画像と抽出したマーカ候補領域の例

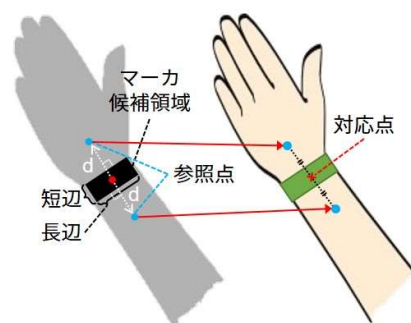
Kinect の赤外線画像における画素とカラー画像における画素の対応関係については、距離画像の Depth 値に基づいて算出することができる。しかし、図 2(b)に示すとおり、同図(c)の輝度値の高い画素については、Depth 値を取得できないため、マーカ候補領域内の画素位置をカラー画像上に再現することができない。そこで、以下のとおり、カラー画像における画素位置を求める。まず、図 3(a)に示すように、マーカ候補領域において長辺と短辺を求め、同領域の中心点から長辺に対して垂直となる 2 つの方向に、短辺の定数倍の長さ d となる位置に参照点を求める。次に、各参照点について、カラー画像における対応画素位置を取得し、これらの中心をマーカ候補領域のカラー画像における対応点として算出する。同図(b)に赤外線画像における参照点の抽出例を示す。

マーカ候補領域色の判定処理については、カラー画像における対応点を中心とした 7×7 の領域内の画素値を HSV 表色系に変換し、色相値 (Hue) のみを用いて基準色と比較する。比較処理では、領域内の画素の 8 割以上が基準色のしきい値以内であれば、該当マーカの領域色であると判定する。図 4 に、図 2(a)のマーカ装着時のマーカ領域の判定結果を示す。判定処理では、図 3(b)上部の小領域についても基準色と比較し、マーカ領域かどうかを判定する。結果として、マーカ領域色と同系の円領域をマーカ領域の対応点として示しているが、マーカ以外の領域は除外され、マーカ領域の位置が正確に表示されていることが分かる。なお、図 4 のカラー画像は、距離画像における Depth 値から再構成したカラー画像であり、各画素については、カラー情報だけでなく Depth 情報も保持している。また、マーカの基準色については、設定を容易に変更できるようマウス操作のみで色相値分布の取得が可能なインタフェース (図 5) を開発し、予め上限値、及び下限値をしきい値として設定している。

2. 4 マーカの位置検出

本システムにおいては、マーカを検出する測定エリアを取得画像上に複数配置し、前節で左右判定されたマーカ領域の対応点を測定エリア内で検出した際に、その位置と時刻を各測定エリアに対して取得することにより、エリア間の検出時間差を動作時間として計測する構成とする。また、任意の部品に対して「取る」、「運ぶ」等の動作の始点、終点位置を各測定エリアに内包するよう設定することで、作業全体を構成する各作業工程の単位動作 (作業動作) として作業時間を計測することが可能である。なお、本稿では、図 6 に示すように、作業の構成を 3 つの階層に分け、作業時間を計測している。

図 7 に、本システムにおける作業時間計測時の画面を示す。画面は、マーカの検出状況と測定エリアを表示する映像表示領域と、作業の進捗状況を示すツリービューから構成される。また、ツリービューは、作業全体を管理するトップノード、作業指示書等の各作業工程を管理するミドルノード、及び作業工程において指定する部品や工具等を用いて正しい位置で作業を行っているかを単位動作として管理するボトムノードから構成される。映像表示領域の矩形枠が測定エリアであり、計測を開始すると、マーカの測定エリアへの侵入を検知することにより、ツリービューにおけるボトムノードの選択状態が次ノードに遷移する。また、それと同時に、映像表示領域には次の測定エリアを表示し、次エリアへのマーカの侵入を待機する。



(a) 参照点・対応点の抽出方法



(b) 参照点の抽出例

図3 抽出した参照点・対応点の例



図4 マーカ領域の判定結果

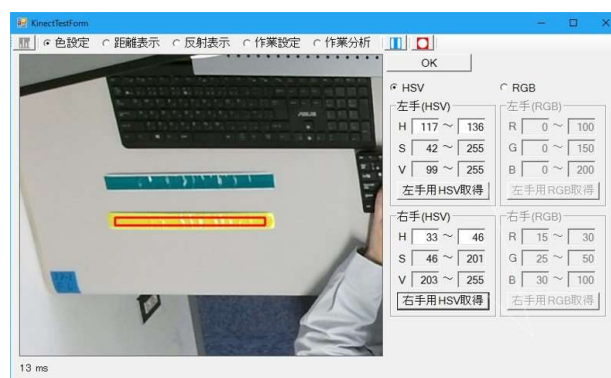


図5 マーカ基準色設定インタフェース

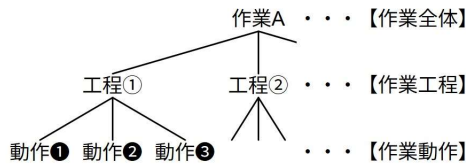


図6 作業の階層構造

測定エリアの設定については、図8に示す作業設定画面においてツリービューのボトムノードを選択すると、映像表示領域内の該当する検出エリアが強調表示され、エリア右下をドラッグすることでエリアの大きさを、エリア内をドラッグすることでエリアの位置を設定することができる。また、ボトムノードを右クリックしてコンテキストメニューを開き、「編集」を選択すると測定エリアに対するマーカの左右の区分等の各項目を変更することができる。新規に追加する場合は、「上に挿入」、または「下に挿入」を選択することで、測定エリアの位置と大きさ、及び各項目を設定することができる。さらに、各ノードにおいて設定内容のコピー機能を付加することで、繰り返し行われる動作等の設定を容易にし、操作性を高めている。なお、作業設定画面においては、検出可能領域を設定することにより、マーカの検出範囲を制限することができる。

3. 実験と考察

3.1 実験の概要

本システムの動作を検証するために、図9に示す作業台を実験室に設置し、Kinectを作業台の作業面から1050mmの高さに取り付け、表1に示す作業工程の順に、PCの組立作業を模した実験を行った。なお、本研究では、組立作業を対象に実験を行っているが、本システムの対象作業については、Kinectを俯瞰可能な位置に設置でき、且つマーカを装着することが可能な作業であれば、様々な作業に応用することが可能である。

実験では、1人の被験者が組立作業を10回試行し、各試行について作業映像を分析することにより、作業時間を計測した。各試行間のインターバルは約1時間以内であるが、1～3回目と4～10回目については試行日が異なり、7回目と8回目の間には約2時間のインターバルがある。

作業時間の計測にあたっては、各工程の作業開始時刻を明確にするために、マーカの初期測定エリアを設定し、各工程を開始する際には、マーカが初期測定エリア内に入るよう手を移動させる初期動作を追加した。そのため、各工程の作業時間は、初期測定エリアにおける検出時刻から、次工程の初期測定エリアにおける検出時刻までとした。また、各工程における個々の動作についても、測定エリア間のマーカ検出時刻の差とし、得られた結果を各動作の作業時間とした。

3.2 作業時間の計測

各測定エリアにおける検出時刻差から求めた作業時間について、作業全体、作業工程、作業動作の各階層に分けて集計した。集計結果の可視化例を図10に示す。

同図(a)は、各試行における作業全体の作業時間の推移である。図より、インターバルを挟んだ最初の試行では作業時間を要しているが、試行を繰り返すに連れて時間が短縮していく様子が確認できる。



図7 作業計測画面

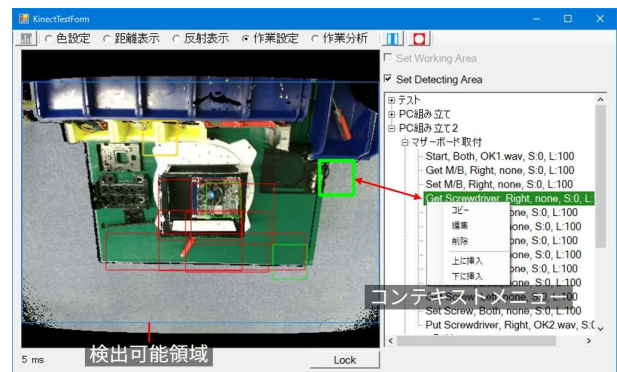


図8 作業設定画面

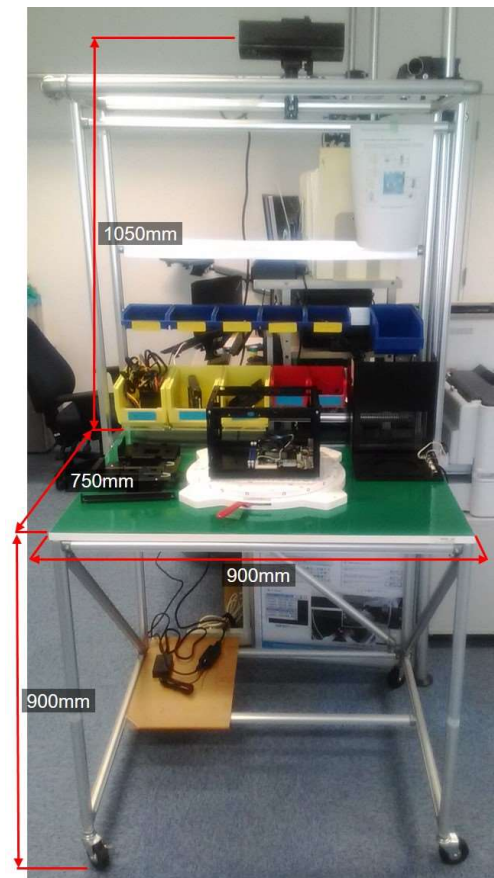


図9 実験における作業環境

表1 実験における作業工程表

No.	作業工程	使用する部品、工具等	動作数
1	マザーボード 取り付け	マザーボード 固定ネジ 4本 ドライバー	13
2	メモリ取り付け	メモリ 2枚	5
3	ファン取り付け	ファン 1個 固定ネジ 4本 ドライバー	18
4	フロントパネル 取り付け	フロントパネル	10
5	電源取り付け	電源 電源用ブラケット 1個 電源固定ネジ 4本 ブラケット固定ネジ 2本 ドライバー	27
6	ブラケット 取り付け	ブラケット 1個 固定ネジ 4本 ドライバー	13
7	HDD取り付け	HDD 1個 HDD用ブラケット 1個 HDD固定ネジ 4本 ブラケット固定ネジ 2本 ドライバー	21
8	HDDケーブル 取り付け	SATAケーブル 1本	11
9	ケースカバー 取り付け	ケースカバー 固定ネジ 4本	14
10	PC確認		4

同図(b)は、作業時間が最大・最小の試行（試行 1、試行 7）について、作業時間を工程毎に集計した時の比較結果である。図は、各試行について、左から順に工程 1～10 の作業時間を表しており、工程 4、及び工程 5 で作業時間が大きく短縮していることが確認できる。

同図(c)は、試行 7 の工程 4 における各動作の進捗状況を示すガントチャートである。各動作に要する作業時間と、その推移が明確となり、負担の大きい動作等の把握が容易となる。

動作単位で作業時間を計測することにより、目的に応じた作業状況の可視化が容易となる。作業時間を様々な方法で可視化することにより、現状の作業に戸惑いやすい手順が含まれていないか、作業台や部品箱は作業者に対してムリのない配置となっているか等、作業動作や製品設計を見直す手掛かりとして重要な情報となり、作業カイゼンの糸口となる可能性がある。また、作業の負荷量やバラツキに関する情報は、作業のムラや作業の習熟度を評価するための指標として利用できるため、作業トレーニングに本システムを用いることも可能であると考えられる。そのため、本システムによる作業時間計測は、作業カイゼンを支援していく上で、有用性が高いと判断できる。

3. 3 作業動作の検出

IE における動作要素の時間分析手法である PTS 法の一つに MTM 法があるが、MTM 法で使用する時間単位は 36 ミリ秒である^[4]。実験では、10 回の試行に要した作業時間は 8,481 秒であり、全取得フレーム数は 253,762 フレームであった。そのため、作業時間計測に要した処理時間は 1 フレームあたり 33.4 ミリ秒であり、この値が作業動作の最大時間分解能に該当する。このことから、本システムについては、十分な処理速度で作業時間を計測することが可能であると言える。なお、実験で使った PC の主な仕様は、

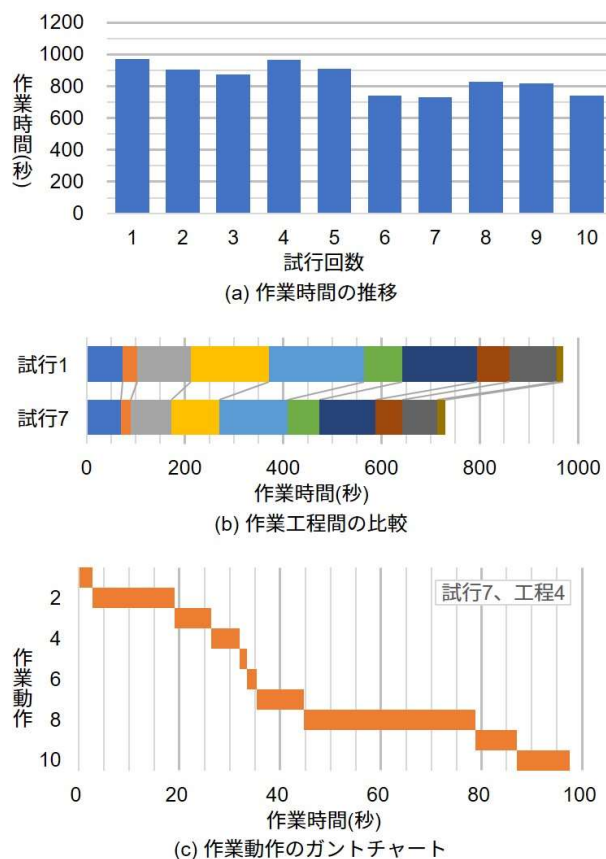


図10 作業時間計測結果の可視化例

CPU が Core i7-7700HQ (2.8GHz) 、メモリが 32GB のラップトップ型パソコンである。

次に、マーカの検出率を求めた。マーカの検出率については、マーカにオクルージョンが発生したり、マーカが検出範囲から逸脱したりして検出できない状況も含まれているが、全取得フレームに対して、左右のマーカが検出されているフレームをそれぞれカウントし、各マーカの検出率を試算した。結果を表 2 に示す。表より、左のマーカ（黄色）の検出率は 83.2%、右のマーカ（緑色）は 70.2%であった。右のマーカの検出率が左に比べて低いものの、右のマーカについて検出結果をフレームレートに換算すると、21.0 フレーム/秒で検出できていると考えられ、時間分解能としては約 47.6 ミリ秒に相当する。そのため、作業時間を計測する上では、良好な結果であると考えられる。なお、左右の差の原因として考えられるのが実験環境における照明の位置である。天井に設置された蛍光灯が左手の作業域の真上にあり、右手の作業域と比較して、照明条件が安定していたと推測している。

最後に、左右のマーカの平均検出率が最も高かった試行 8 について、検出したマーカ位置を追跡処理した描画結果を図 11 に示す。検出ミスが若干あるものの、左右の手の作業域を容易に把握できるため、作業時間計測結果と合わせて評価することにより、作業カイゼンを図る上で有益な情報であると判断できる。なお、図中の検出ミスについては、測定エリアにおける検出ミスではないため、作業時間計測上は特に問題がない。

表2 マーカの検出率

試行	作業時間(秒)	フレーム数	検出数(左)	検出数(右)	検出率(左)	検出率(右)	平均検出率
1	971	28,701	22,733	21,154	79.2%	73.7%	76.5%
2	906	27,505	22,749	20,352	82.7%	74.0%	78.4%
3	875	25,128	19,750	18,387	78.6%	73.2%	75.9%
4	964	28,746	24,766	19,092	86.2%	66.4%	76.3%
5	910	26,750	22,383	16,607	83.7%	62.1%	72.9%
6	741	22,477	18,598	15,339	82.7%	68.2%	75.5%
7	730	21,810	17,495	14,806	80.2%	67.9%	74.1%
8	826	25,172	21,894	18,247	87.0%	72.5%	79.7%
9	819	24,807	21,076	17,928	85.0%	72.3%	78.6%
10	740	22,666	19,671	16,116	86.8%	71.1%	78.9%
計	8,481	253,762	211,115	178,028	83.2%	70.2%	76.7%

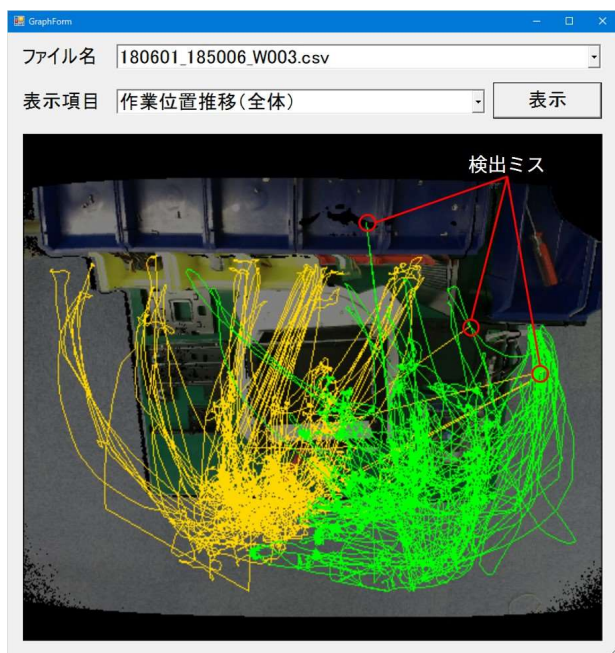


図11 マーカ位置の追跡結果例

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、システム開発にご協力をいただきましたレシップエスエルピー株式会社の皆様に深く感謝の意を表します。

文 献

- [1] 藤田彰久, “IEの基礎”, 建帛社, 1997.
- [2] 鈴木準, “IEを活用した現場改善のススメ”, ロジスティクス・ビジネス, Vol.9, pp.20-23, 2005.
- [3] 株式会社ブロードリーフ, “OTRS”, <https://www.otrs.jp/>.
- [4] 株式会社日本生工技研, “TimePrism”, <https://www.jiet.co.jp/>.
- [5] 板倉豊和, 服部可奈子, 折原良平, “工場作業者の作業軌跡データからのムダ作業発見”, 信学技法, PRMU2006-116, pp.71-76, 2006.
- [6] 高橋典宏, 山澤一誠, 生雲公啓, 野田賢, 横矢直和, “人物大装置の組み立て作業改善活動支援のための俯瞰距離画像からの人物姿勢分類”, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.7, No.14, pp.93-104, 2008.
- [7] 熊谷卓也, “ジェスチャー認識装置を用いた人体位置検出と工程作業動作分析への応用”, コニカミノルタテクノロジーレポート, Vol.11, pp.42-47, 2014.
- [8] 松原早苗, 渡辺博己, 曾賀野健一, 棚橋英樹, “距離画像を用いた両手作業の動作解析システムの開発”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.18, pp.24-29, 2017.

4. まとめ

本研究では、作業台の作業面を俯瞰するように設置した距離画像センサを用いて、作業者の手首に装着した再帰性反射型マーカを精度良く検出し、特定の領域を通過する際の時刻を取得することにより、作業時間を動作単位で計測するシステムを開発した。

組立作業を模した実験では、計測結果から複数のグラフを作成し、作業時間の推移が容易に把握できることを確認した。また、時間分解能を検証し、約 47.6 ミリ秒間隔で時間計測が可能であることを確認した。

今後は、作業現場の要望に応じて、リアルタイムに作業状況を可視化する作業管理技術を開発する予定である。また、実際の作業現場における実作業でのシステムの検証を行うとともに、より安定した作業時間計測のために、マーカの検出精度の向上を検討する予定である。さらに、組立作業以外の作業についても検証を行い、汎化性能の向上を目指す予定である。