

距離画像センサを用いた作業時間計測システム Working Time Measurement System using Depth Sensor

渡辺 博己[†] 生駒 晃大[†] 棚橋 英樹[†]
Hiroki Watanabe Akihiro Ikoma Hideki Tanahashi

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 を活用し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し、計測ノウハウを有する人材の育成や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。文献[5]では、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。文献[6]では、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。しかし、これらのシステムは、ムダな作業や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。文献[7]では、安価な距離画像センサである Microsoft 社の Kinect を用いて、内蔵 API 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。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 を配置することにより、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両手位置を求め、作業時間を計測するシステム[8]を試作しているが、背景が変化する作業環境に対応できない等の課題があった。

そこで、本稿では、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時間計測システムを提案する。再帰性反射マーカを作業者の両手首に装着し、Kinect の赤外線カメラで抽出することにより、環境変動にロバストで、安定した両手首位置の計測が可能である。以下、提案システムについて記述し、実験室環境における組立作業を模した実験結果について報告する。

[†] 岐阜県情報技術研究所

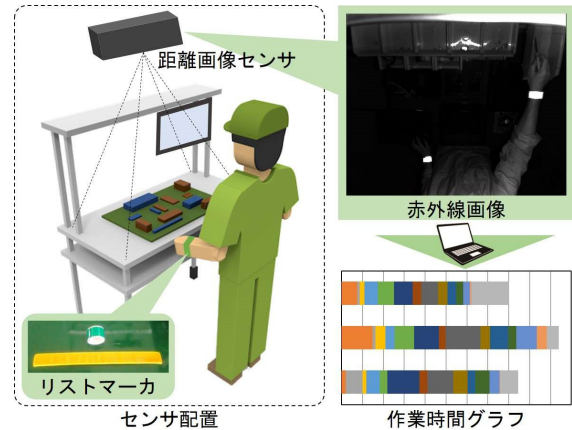


図 1 提案システムの構成

2. 作業時間計測システム

2.1 システムの概要

図 1 に提案システムの構成を示す。提案システムでは、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リスト型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、及び終点を含むように、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、測定エリア間の通過時間を動作時間として作業時間グラフを生成する。

システムの作業時間計測処理は、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、次節以降、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。再帰性反射材は、赤外線カメラで撮影した場合、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利用することで、マーカを手首に装着した場合、手首が回転してもほぼ同一の形状として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。

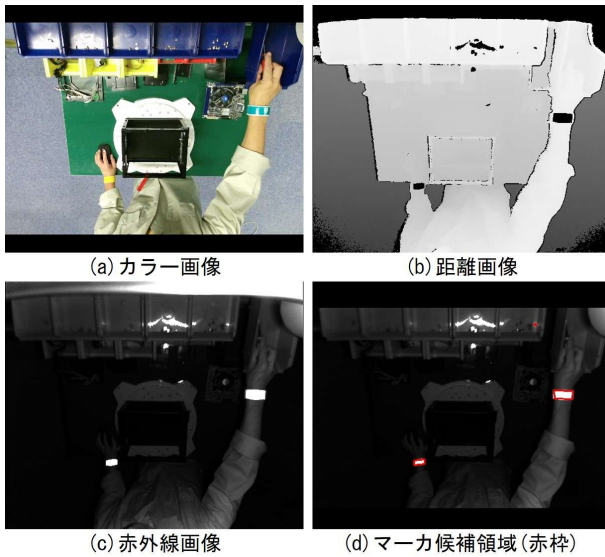


図 2 取得画像とマーカ候補領域の抽出

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。

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おいては、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色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し、マーカ領域の位置を正確に表示し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に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。

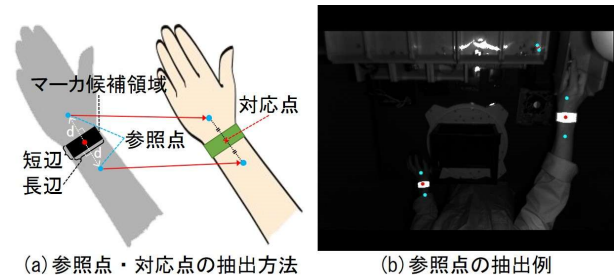


図 3 参照点・対応点の抽出

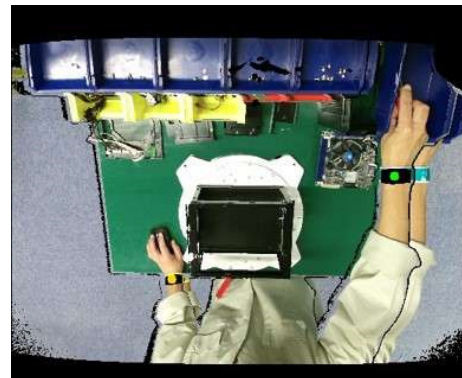


図 4 マーカ領域の判定結果

2.4 マーカの位置検出

提案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に設定することで、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 5 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 6 に、提案システムの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、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下に遷移する。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。

測定エリアの設定については、図 7 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

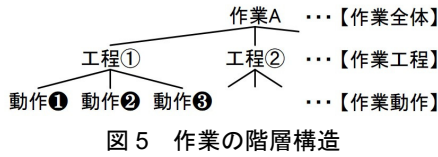


図 5 作業の階層構造



図 6 作業時間計測画面

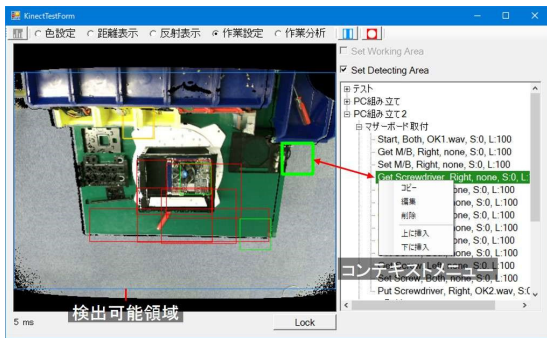


図 7 作業設定画面

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

提案システムの動作を検証するために、図 8(a)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、同図(b)に示す作業工程順に PC の組立作業を模した実験を行った。

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時間を計測した。各試行間隔は、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 回目の試行間隔については、2 時間の差がある。

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

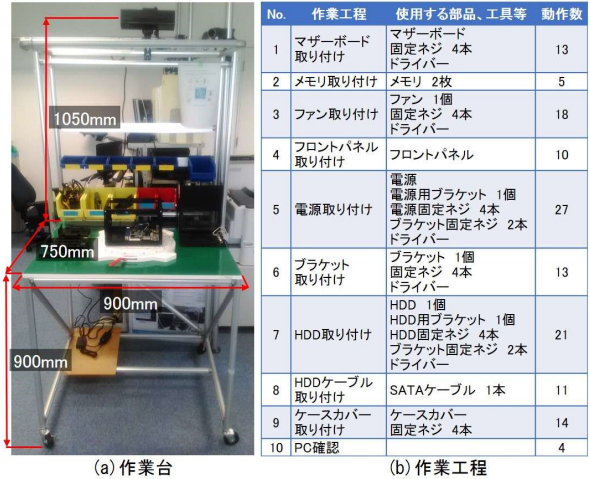


図 8 実験環境と実験作業

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

図 9 に、各測定エリアにおける検出時刻差から求めた作業時間を、作業全体、作業工程、作業動作について、それぞれ集計した結果の可視化例を示す。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、試行を繰り返すに連れて作業時間が短縮している状況が確認できる。同図(b)は、作業時間が最大・最小の試行について、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。各動作にかかる作業時間と推移が明確となり、負担の高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辛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提案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、提案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 法で使用される時間単位は 36 ミリ秒である[1]。実験では、10 回の試行に要した実験時間は 8,481 秒であり、全処理フレーム数は 253,762 フレームであった。そのため、1 フレームあたりの作業時間計測に要する処理時間は 33.4 ミリ秒であり、この値が作業

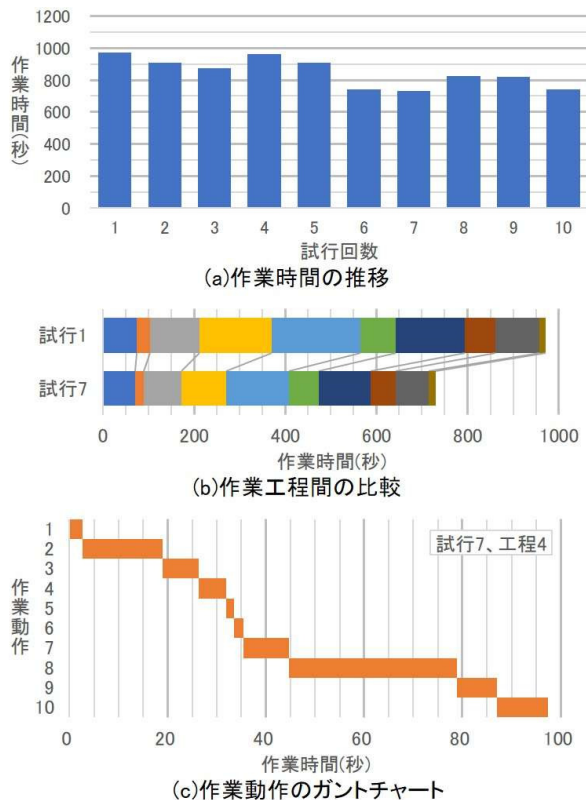


図9 作業時間計測結果の可視化例

動作の最大時間分解能に該当する。このことから、提案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ことを確認した。なお、実験で使用したPCの主な仕様は、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、全処理フレームにおいて各マーカが検出できているフレームをカウントし、左右のマーカの検出率を試算した。その結果、左のマーカ(黄色)については83.2%、右のマーカ(緑色)については70.2%であることを確認した。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は、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(試行8、79.7%)について、検出したマーカ位置を追跡処理した結果を図10に示す。検出ミスが若干あるものの、左右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、検出ミスについては、作業時間計測上は特に問題がないことを確認している。

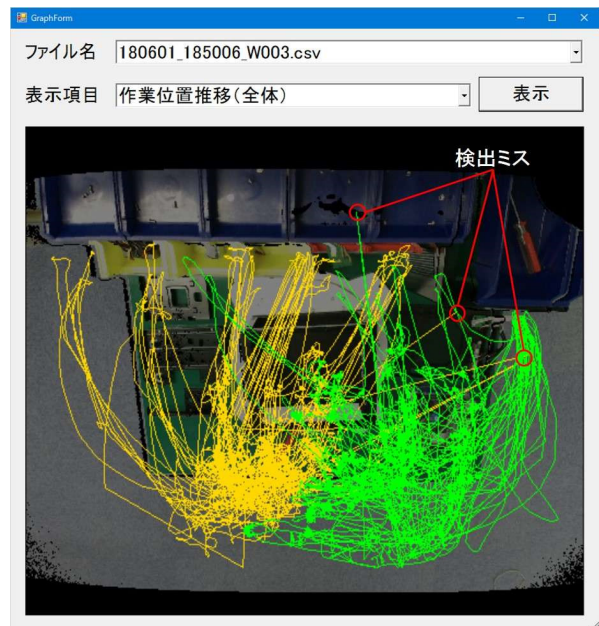


図10 マーカ位置の追跡処理結果の例

4. おわりに

本稿では、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、作業員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提案した。また、組立作業を模した実験により、提案システムの作業時間計測における有用性を確認した。

今後の課題は、実際の作業現場における実作業での提案システムの検証と、より安定した作業時間計測のためのマーカ検出精度の向上である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、提案システムの予備実験にご理解とご協力、さらにはシステムの機能開発にご助言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。

参考文献

- [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”, <http://www.jiet.co.jp/>.
- [5] 板倉豊和, 服部可奈子, 折原良平, “工場作業員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”, コミュニカ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.