

距離画像を用いた両手作業の動作解析システムの開発

松原 早苗

渡辺 博己

曾賀野 健一

棚橋 英樹

Motion Analysis System for Both Hands Work using Depth Image

Sanae MATSUBARA

Hiroki WATANABE

Kenichi SOGANO

Hideki TANAHASHI

あらまし 本研究では、製造現場の組立セルにおける両手作業のカイゼン活動を支援するため、距離画像カメラにより取得される距離画像を用いて両手の位置を検出することで、作業の動作時間を計測するシステムを構築した。まず、距離画像から形状特徴を抽出することで、両手の位置を検出する。そして、取得された手の位置が、指定したエリアを通過することを判定することにより、前エリアの通過時刻から現エリアを通過するまでの時間を、作業の動作時間を計測した。実験では、実際の組立作業の距離動画像に対して、作業を構成する右手、左手のそれぞれの動作の時間を計測した。

キーワード カイゼン、作業動作解析、両手検出、距離画像、形状特徴

1. はじめに

製造現場においては、製造設備と材料・部品および作業からなる総合的なシステムの効率化が求められるが、労働者の高齢化や定着率の低下、多品種少量生産の増加に伴い、製造設備や部品の性能向上に比べ、人による作業の品質、生産性向上は十分でなく常に課題となっている。

この課題の解決には、インダストリアル・エンジニアリング（IE）と呼ばれる作業者の動作を分析する工学的手法が用いられている^[1]。しかし、最も基礎的で重要なデータである作業者の動作時間の計測は、ストップウォッチやビデオ映像を用いた手作業となっており、この動作時間データの取得に膨大な時間と手間を要することが、カイゼン活動の普及の妨げとなっている^[2,3]。

人が動作時間を計測する場合、限られた期間の計測となるため、「部品を落とす」、「部品を取り付け忘れる」など標準作業から外れるイベント発生の検知が限られる。標準作業以外のイベントの発生が、生産効率を下げる、品質を落とす原因となることが多く、このイベントを限界まで減らすことが、大きな改善につながる。しかし、このイベントを検知するためには、長時間にわたり、常時、計測する必要があるが、人手による計測では困難である。また、リアルタイムに動作時間を計測することができれば、生産計画への反映や、その場で作業ミスを検出するポカヨケなど、生産効率や品質を向上させるための適用場面が広がる。そのため、動作時間を自動的に計測できるシステムが求められている。

そこで、本研究では、製造現場の組立セルにおける両手作業のカイゼン活動を支援するため、距離画像カメラ

を用いて作業を撮影し、得られる距離画像から両手の位置を検出することで、作業の動作時間を計測するシステムを構築した。具体的には、まず1枚の距離画像に対して、手部の形状特徴を抽出することで、両手の位置を検出する。そして、右手、左手それぞれに対して、通過を判定するエリア設定し、前エリアの通過時刻から現エリアを通過するまでの時間を、作業の動作時間として計測する技術を開発した。本報告では、実際の組立作業の距離動画像に対して両手の位置を検出し、作業を構成する右手、左手のそれぞれの動作時間を計測する実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 対象作業

本研究では、製造現場の組立セルにおいて、標準作業が決められ、繰り返し行う両手作業を対象に、動作時間を計測する。想定する組立セルの作業環境を図1(a)に示す。

本報告において計測する作業の動作の単位は、動作研究におけるサブリック（動作の最小分解要素）^[2]にあたる単位とする。18種類からなるサブリックの中でも、手の位置情報を用いて計測するため、手が大きく移動する「空手で延ばす」、「運ぶ」を主な計測の対象動作とする。「空手で延ばす」は、ものを持たずに移動し始めるとき、「運ぶ」は、部品を持って動き始めるときの動作である。これらの作業の動作は、手の移動量が大きく、動作時間が長いので、カイゼンによる効果が大きい対象である。

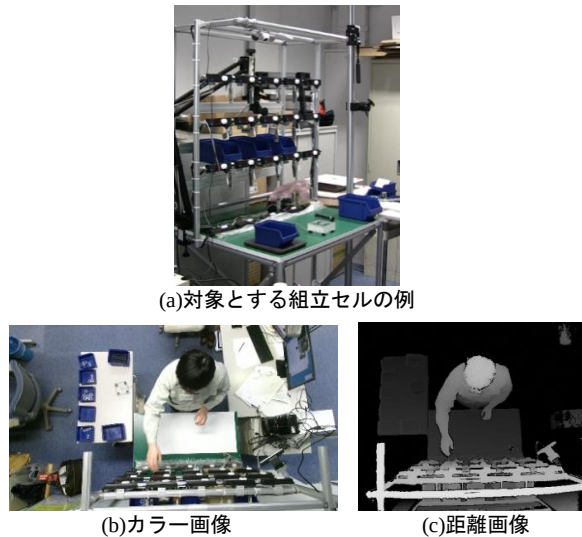


図1 対象とする作業環境と取得画像

3. 両手の位置検出

組立セルにおける作業の動作には、図1(a)のように複数の段がある部品棚に手を伸ばす動作が多くあり、どの部品箱に手を伸ばしたか、高さを識別する必要がある。また、照明変動や作業者の服装に影響を受けにくいことが求められる。

そこで、本手法では、高さ情報が得られ、照明変動に強く、作業者の服装の変化の影響を受けにくい距離画像から手部の形状特徴を抽出し、両手の位置を検出する。以下に、提案手法における各処理の詳細について述べる。

3. 1 距離画像

本研究では、距離画像の取得にはKinect v2を用いる。Kinect v2は、TOF(Time of Flight)方式で、距離情報を得ている。TOF方式は、カメラの周囲についてLEDより照射される赤外光が対象物に反射し、カメラで観測されるまでの時間を計測することにより、物体までの距離を計測する。Kinect v2のスペックを表1に示す。距離値はmmの単位で取得できる。本報告では、Kinect v2を用いたが、提案手法は、Light Coding方式やステレオ方式など、他の方式により距離情報を取得する距離画像でも用いることができる。

距離画像カメラを、部品箱と作業のための両手の移動範囲が入るよう、部品棚の上部から作業台に向け組立セルに設置した。得られるカラー画像と距離画像を、それぞれ図1(b), (c)に示す。ここでは、距離画像は、各画素に対してカメラからの距離500mmから1780mmまでの範

表1 Kinect v2のスペック

カラー画像	解像度	1920×1080
	フレームレート	30fps
距離画像	解像度	512×424
	フレームレート	30fps
距離取得範囲		0.5m～8.0m
距離画像の画角		70°(水平) × 60°(垂直)

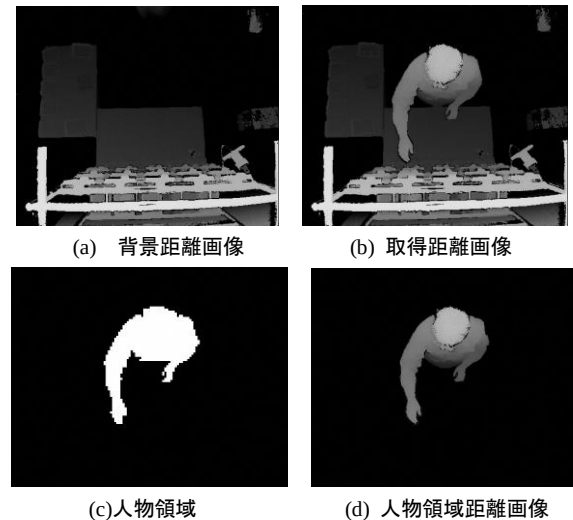


図2 距離背景差分により抽出した人物領域

囲を5mm間隔で、255から0の256段階の濃淡値に対応させ、濃淡画像として生成した。以降、この濃淡画像を距離画像として扱う。

3. 2 人物領域の検出

提案手法では、人物領域を、距離画像の背景差分により抽出する。まず、作業者がいない状況で、背景距離画像(図2(a))を取得する。次に、現時刻で取得される距離画像(図2(b))と、背景距離画像の画素値に対する差分をとり、その差が閾値 Th_m より大きい画素を抽出する。ここでは、閾値 Th_m を10(50mmにあたる)とした。抽出した領域に対して、膨張収縮処理を行い、最も大きい面積をもつ領域を人物領域として抽出する(図2(c))。現時刻の距離画像(図2(b))に、人物領域(図2(c))のマスクをかけ、得られる距離画像を人物領域距離画像として抽出する(図2(d))。

3. 3 身体部位の形状特徴の抽出

頭部は丸く、胴体部は領域が大きい、腕部は細い、手部は端点で閉じているという形状の特徴に着目し、3.2にて抽出された人物領域距離画像に対して形状特徴を抽出することで、頭部、胴体部、腕部、手部の領域を検出する。

本研究では、形状特徴として、RRC(Radial Reach Correlation)特徴量のリーチ長を用いる。RRCは、明度変動の影響に頑健で、画素単位で局所的なテクスチャを評価可能な特徴量であり、主に、濃淡画像を対象に、明度変動に頑健な背景差分や物体検出を行う目的で用いられている。RRC特徴量の抽出方法は、まず、注目画素から放射状の延長腕(リーチ)を伸ばし、閾値以上の濃淡値の差をもつ画素を探査し、ペアを構成する(図3)。特性に等方性を持たせるため、放射状の8方向について8組のペアをもつ。そして、ペアの画素(以降ペア画素と呼ぶ)の濃淡値が、注目画素の濃淡値より大きい場合は1を、小さい場合は0を割り当て、それをあらかじめ定義し

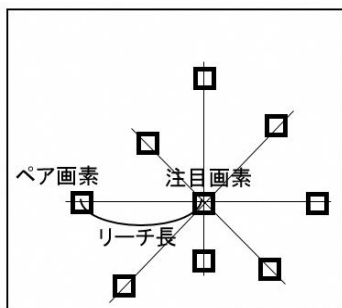


図3 リーチの形成

た順序で並べた二値符号列がRRC特徴量である。

本研究では、3. 2にて抽出した人物領域距離画像に対して、RRC特徴量の8方向のリーチ長を形状特徴として抽出する。距離画像は、各画素に距離情報をもつが、3. 1において述べたように、距離情報を濃淡値に対応させた濃淡画像として扱う。図2(d)の入力画像における各部位ごとの注目画素に対して、ペア探索処理を行い得られる8組のペアの取得例を図4に示す。注目画素を白の丸、リーチ長が閾値以上のペア画素を黄の四角、閾値以下のペア画素を水色の十字で示す。ここでは、ペアを決定する明度差の閾値 Th_{rd} を15とし、リーチ長の長短を判定する閾値 Th_{rl} は9とした。

頭部は丸く、胴体部は領域が大きい、腕部は細い、手は端点で閉じているという各部位の形状特徴を、リーチ長を用いて表す。図4(a)は、注目画素が頭部領域にある場合で、上方向から撮影した場合、頭部は円形となるため、8ペアのリーチ長の差が小さい。図4(b)は胴体部にある場合で、リーチ長の和が大きい。図4(c)は腕部にある場合で、リーチ長が長いペアと短いペアが交差する。図4(d), (e)は手部にある場合で、リーチ長の多くが短く、腕の方向のリーチ長は長い。各部位の形状特徴とリーチ長にこのような傾向がみられることから、本報告では、リーチ長(8個の値)に対して、以下の条件により各部位領域を抽出する。

- ・頭部 : リーチ長の最大と最小の差が閾値 Th_h 以下
 - ・胴体部 : リーチ長の和が閾値 Th_t 以上
 - ・腕部 : リーチ長が長いペアと、短いペアが交差する
 - ・手部 : 短いリーチ長が6個以上連続する
- 以上の条件により、図2(d)の人物領域に対して走査し、

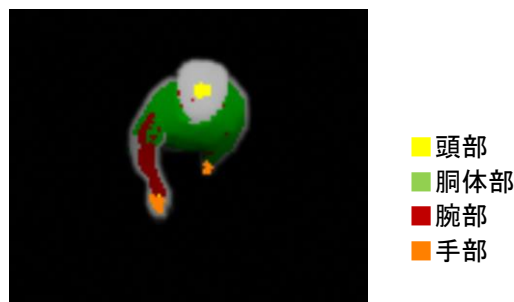


図5 抽出した各身体部位の領域

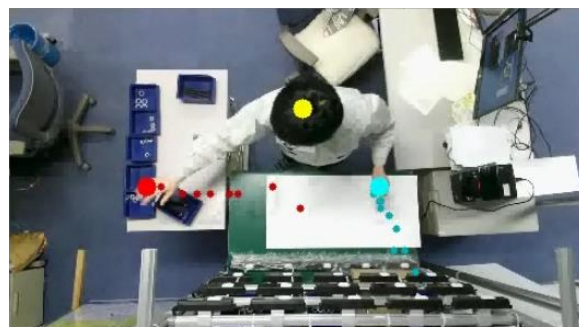


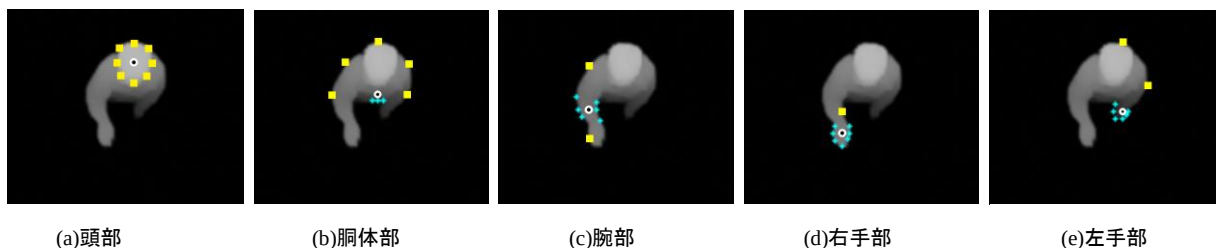
図6 両手の位置、頭部位置の検出結果
(右手 : 赤, 左手 : 水色, 頭部 : 黄)

抽出した各部位の領域を図5に示す。頭部、胴体部、腕部、手部をそれぞれ黄、緑、赤、オレンジで表示した。概ね各部位の領域が抽出されていることがわかる。ここで用いた閾値 Th_h 、 Th_t は、経験的にそれぞれ、10、90とした。距離画像の解像度は 512×424 で取得されるが、リアルタイムに処理するため、 128×106 にダウンサイジングを行い、処理を行った。

3. 4 両手位置の検出

3. 3にて抽出された各部位の領域の内、2つの手部領域、頭部領域に対して、それぞれの領域の中心を手の位置、頭部の位置として検出する。そして、2つの手の位置に対して、右手か左手かを判定する。手の2点のX座標値を比較し、X座標値が小さい方を右、大きい方を左と判定することができる。しかし、両手が交差した際は、反対の判定となる。

そこで、手の左右の判定は、まず、腕部領域で最大の領域を抽出し、その領域の胴体部側の端点が頭部位置に対して、左右のどちらに位置するかで判定する。次に、腕部の最大領域と連続する手にその判定結果を与える。



(a)頭部

(b)胴体部

(c)腕部

(d)右手部

(e)左手部

図4 各部位におけるペアの形成

(注目画素 : 白の丸, リーチ長が閾値以上のペア画素 : 黄の四角, 閾値より小さいペア画素 : 水色の十字)

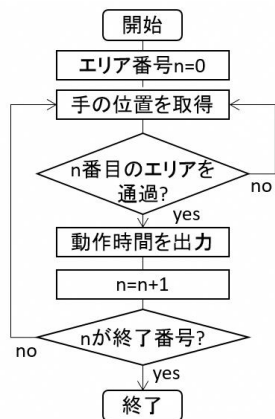


図7 動作時間計測処理の流れ

図5の場合、腕部領域が一つであり、胴体部側の端点が右であることから、この腕部領域と連続する手が右と判定され、もう一方の手が左と判定される。両手が交差する動作が入る作業の場合は、このような処理により、左右の判定を行う。

ある動作の一連の動きに対して、提案手法により検出した距離画像座標系における両手の位置座標を、カラー画像の座標系に変換し、カラー画像上にプロットしたものを図6に示す。右手を赤、左手を水色、頭部を黄で示した。各部位の位置が検出できていることがわかる。大きい丸が現時刻における各部位の位置であり、小さい丸が過去10フレームの各部位の位置である。

4. 動作時間の計測

製造現場においては、作業の動作の内容と順序は、作業手順書により定められている。治具から部品箱へ「空手で延ばす」動作の場合、手は、始点である治具の位置から終点となる部品箱の位置までを移動する。治具や部品箱が固定されている組立セルにおいては、作業手順書により手の移動するルートが決まる。そこで、本報告で

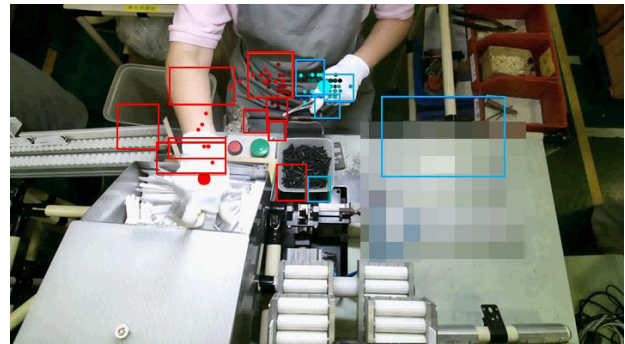


図8 通過エリアの設定

は、作業手順書に従い、あらかじめ計測したい動作の始点と終点の位置とその通過順序を設定し、3章により得られる手の位置がその設定位置を通過した時刻から、次の設定位置を通過するまでの時間を動作時間として計測する。

具体的には、まず、手が通過すべき点、つまり、作業を構成する動作の始点と終点の位置を、作業の開始から終了までに対して設定する。次に通過する順序、そして、各点に対して通過の判定を行う通過判定エリアを設定する。この通過判定エリアは、部品箱の大きさや組立品の大きさにより異なるため、通過判定エリアサイズや形は個々に設定する。両手の左右それぞれに対して、通過判定エリアを設定する。

取得される手の位置が1番の通過判定エリアを通過した時点をも、作業の開始とし時刻の計測を開始する。次に、手の位置が、2番目の通過判定エリアを通過するまで通過の判定を行い、通過時に時刻を取得し、前エリアの通過時刻からの時間を動作時間として出力する。最後n番目の通過判定エリアまで通過の判定を繰り返す。この処理を右手、左手に対して行う。処理の流れを図7に示す。

5. 実験

刃物製品の組立工程における、実際の作業に対して距離動画像を取得し、両手の位置検出を行うことで、作業の動作時間の計測を行った実験結果を示す。

5. 1 実験の設定

実験を行う作業の動作内容を示す作業指示書を表2に示す。距離画像カメラは、組立セルの作業員から見て前方上部に、作業台上面と作業員の両手の動作範囲が入る位置、角度で設置した。この作業は座り作業であり、頭部の移動はほとんどなく、右手、左手が交差する動作がない。そこで、この実験では、頭部の検出は行わず、両手の位置のみを検出することとした。右手、左手の判定は、両手が交差することがないことから、得られた手部の2点のX座標を比較し、X座標が大きい方を左、X座標が小さい方を右と判定した。

実験で用いる距離画像カメラにより取得した作業映像は3分28秒であり、13回の作業を含んでいる。サンプリング

表2 実験作業の作業指示書

No	左手	右手	No
L0	機械から部品Dを取る	部品Aを取る	R0
L1	部品Dを治具にセット	部品Aを機械にセット	R1
		スイッチを押す	R2
L2	部品Eを取る	部品Bを取る	R3
L3	部品Eを治具にセット	部品Bを治具にセット	R4
L4	治具で、部品B,D,Eを組み合わせてWにする		R5
L5	調整、確認		R6
	調整、確認	部品Cをとる	R7
		部品CをWにはめる	R8
		Wを完成品箱へ流す	R9

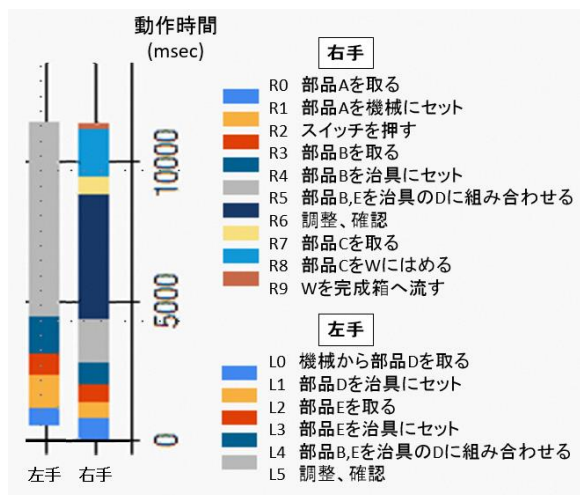


図9 計測した動作時間と動作内容の対応

グレートは30fpsで、距離画像、カラー画像が取得される。距離画像の解像度は、 100×75 にダウンサイジングし、用いた。この実験において用いる各閾値は、 Th_m は10、 th_rd は15、 Th_rl は7とした。

計測したい動作に区切る通過判定エリアを、表2の作業指示書と対応させ、図8に示すように、右は10個（R0～R9）、左は6個（L0～L5）と、左右それぞれに対して設定した。また、この図8には、カラー画像に右手、左手の現時刻の位置（大きい丸）と、過去20フレームの手の位置（小さい丸）をプロットした。作業映像全体を通して、両手の位置は、目視にて確認したところ、誤検出することはない。図8には、守秘義務により画像の一部にフィルタ処理を加えている。

図9は、ある一つの作業において計測した動作時間である。左右それぞれに対して、動作の内容と対応付けられた動作時間が計測できることがわかる。

図10に、13回の作業を含む作業映像全体に対して動作時間を計測した結果を示す。図10のグラフにおいて、動作の内容を表す項目は、図9の項目と対応している。提案

手法では、手の位置が通過判定エリアを通過し、次の通過判定エリアを通過するまでの時間を動作時間として計測している。作業映像全体に対して、正しく動作時間の計測処理が動作していることを目視にて確認した。

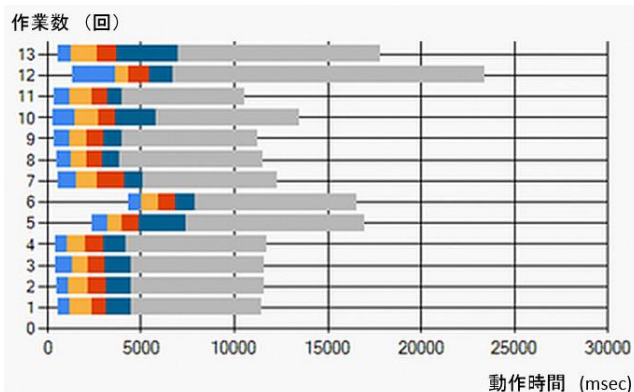
この作業の生産計画を行うために設定された標準作業時間は、約14秒である。概ね標準作業時間以内で作業が行われていることがわかる。一方、5回目、6回目、12回目、13回目の作業は、標準作業時間を超えている。

これらの作業の映像を確認したところ、5回目の作業では、右手が作業の開始を判定する通過判定エリアR0を通過後、「作業着を整える」動作が入り、5回目の右手1番目（R0→R1）の動作時間が長く計測された。また、5回目の作業の右手8番目（R7→R8）「部品Cを取る」動作において、部品Cを落とした。このようなイレギュラーなイベントの発生により、標準作業にはない「落とした部品の位置を確認する」動作、再度部品箱から「部品Cを取る」動作が入った。その右手の動作が、以降の通過判定エリアR8、R9、そして次の6回目の作業のR0を通過した。そのため、次の作業の計測が始まり、6回目の作業の右手1番目（R0→R1）の動作時間が長く計測された。

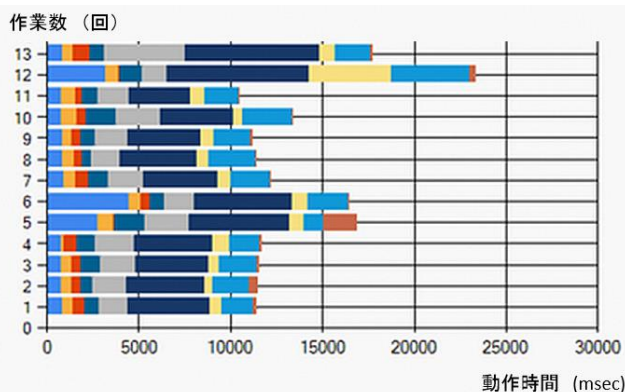
12回目の作業では、その前の11回目の作業で、右手8番目（R7→R8）「部品Cを取る」動作の際、もう一つ部品Cが飛び出し、隣の部品箱に入った。そのため、12回目の作業の「部品Cを取る」動作の際、部品Cの部品箱でなく、「隣の部品箱から取り出す」動作となった。そのため、部品Cの部品箱の通過判定エリアR7を通過せず、12回目の作業の右手7番目（R6→R7）の動作の時間が長くなった。

13回目の作業では、右手5番目（R4→R5）、左手4番目（L3→L4）の「右手の部品Bと、左手の部品Eを治具の部品Dに組み合わせる」動作において、組み合わせに時間がかかっていた。

5回目の作業において部品Cを取り付ける際に落とし、再度部品Cを部品箱から取り出す動作が、次の通過判定エリアや、次の作業の開始を判定するエリアまでを通過し、次の作業の動作時間にまで影響を与えた。この点に



(a)左手の動作時間



(b)右手の動作時間

図10 距離背景差分により抽出した人物領域

関しては、手の位置情報だけでなく、機械のスイッチ信号等、他のセンサ情報と組み合わせることで、異常が発生した際にも、次の作業の計測に影響を与えないような仕組みを検討する必要がある。

作業映像の提供者へこの結果を示したところ、5回目の作業にて発生した作業着を整える動作が頻繁に入る場合は、作業着の材質やサイズを調整する。また、12回目の作業の際発生した、部品Cを取出す時、もう一つ部品Cが飛び出したことについては、部品箱での部品Cの配置を検討するなどの改善案が出された。

このように、動作時間を計測し、可視化することで、部品を落したり、決められた部品箱から取り出されていなかったり、服装を整えたりするなどの標準作業と異なる動作の発生を検知できることを確認した。そして、標準作業と異なる動作が入った映像を確認し、問題の原因を分析することで、効果的な改善案を出せることが期待できる。人手による計測では難しい長時間、常時の計測を可能とすることで、カイゼンの速度の向上が期待できる。

6. まとめ

本研究では、製造現場の組立セルにおける両手作業のカイゼン活動を支援するため、作業を距離画像カメラで撮影し得られる距離画像から両手の位置を検出し、作業の動作時間を計測するシステムを構築した。まず、距離画像に対して、手部の形状特徴を抽出することで、両手の位置を検出した。そして、右手、左手それぞれに対して、通過を判定するエリア設定し、前エリアの通過時刻から現エリアを通過するまでの時間を、作業の動作時間を計測する技術を開発した。実際の作業現場における作

業映像に対して実験を行い、計測した動作時間から標準作業と異なる動作の発生を検知できることを示した。

今後は、長時間の評価実験、また、他の作業に対しても実験を行い、提案手法の汎用性を高める。また、長時間の動作データの分析と、リアルタイムに動作データを分析することでポカヨケへの展開を検討する。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人遠藤斉治朗記念科学技術振興財団の助成を受けたものである。また、本研究を進めるにあたり、実証実験において、御支援・御協力を頂きましたカイ インダストリーズ株式会社の皆様に深く感謝致します。

文 献

- [1] 藤田彰久，“IEの基礎”，建帛社，1997.
- [2] 平野裕之，“新作業研究”，日刊工業新聞社，2001.
- [3] 曾賀野健一，渡辺博己，棚橋英樹，“IEによる作業工程分析及び可視化手法の研究”，岐阜県情報技術研究所研究報告，Vol.13，pp.47-50，2011.
- [4] 佐藤雄隆，金子俊一，丹羽義典，山本和彦，“Radial Reach Filter (RRF) によるロバストな物体検出”，信学論(D-II)，vol.J86-D-II，no.5，pp.616-624，2003.