

IEによる作業工程分析及び可視化手法の研究

曾賀野 健一 渡辺 博己 棚橋 英樹

Research of Workflow Analysis and Visualization for IE

Kenichi SOGANO Hiroki WATANABE Hideki TANAHASHI

あらまし セル生産等の作業現場では、経済的かつ生産性（作業効率）を高めるための作業カイゼンが求められているものの、人件費等の問題からカイゼン活動が停滞し、標準的な作業能力（時間時間等）を把握できていない企業が大半を占めている。そこで、動作計測・解析技術（映像等から人の動きを計測・解析する技術）等を用いて、簡単かつ廉価に作業ごとの時間を計測し解析できるツールの開発を目標とする。さらに、セル生産等の作業現場において用いられる立体的（3次元空間）領域での動作計測・解析を可能とするための手法を確立する。

本年度は、動作計測用装置の選考及び特性の調査、動作特徴量抽出手法の検討を行った。

キーワード 映像、動作解析、作業時間、カイゼン、3次元空間

1. はじめに

セル生産等の作業現場では、急激な少子高齢化による労働力人口の減少と多品種少量生産の増加に伴い、限られた生産投入資源（人、機械等）を有効活用し、経済的かつ生産性（作業効率）を高めるための作業カイゼンが求められている^[1]。

作業カイゼンや作業設計を目的とした作業分析は、IE（Industrial Engineering）と呼ばれる工学的手法が用いられることがあるが、これは「人、モノ、設備及び情報を統合し、最も経済的な仕事のシステムを設計、改善、確立すること」を意味しており、作業員一人あたりの生産性を高めるには、作業員に無駄な動きをさせてはならないという発想に基づいている^[1]。IEは、作業研究として作業工程に費やす時間等を計測分析し、標準的な作業能力の算出、人件費等の原価管理、作業負担の軽減や効率化を図るためのツールとして用いられる^[2]。

しかしながら実際の作業現場では、現状を分析するため作業時間等を人がストップウォッチ、ビデオ等を用いて作業を計測・観察する必要がある。この作業には膨大な時間と手間を要し、計測技術を有する人材の育成、人件費等の問題からカイゼン活動が停滞し、標準的な作業能力を把握できていない企業が大半を占めている^[3]。また、人による時間計測では、長時間、長期にわたる作業時間の計測が困難なため、時間帯や人による作業のムラ等を評価するまでには至っていないのが実状である。

そこで、動作計測・解析技術（映像等から人の動きを計測・解析する技術）等を用いて、簡単に作業ごとの時間を計測し解析可能なツールの開発を目標とする。

動作計測・解析技術については、これまでに当研究所において研究開発を進めてきており^[4-6]、自動車保安部品

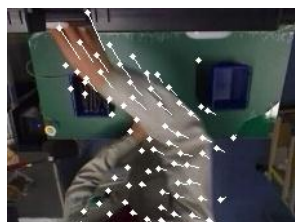
のネジ締め作業や梱包作業の現場において検証を行い、その有効性を示してきた。しかしながら、これまでの動作計測・解析技術では作業工程ごとに要する時間を自動計測することはできない。また、平面的な作業領域に対する動作にしか対応できない点に解決すべき課題が残されている。作業の対象領域を2次元平面から3次元空間に拡張することができれば、作業領域が拡大化・複雑化している作業現場への適用範囲がさらに広がると考えられる。

2. 従来の動作計測・解析技術

従来の動作計測・解析技術は、画像から顔や手等の注目部位を切り出す手法ではなく、オクルージョンや作業者の服装の変化、照明変化等の影響を受けにくい局所特徴の統計量を用いるアプローチ^[7]とした。具体的には、局所的な動きベクトルとしてオブティカルフローを用い、その統計量である動作の大きさと方向分布を表す方向ヒストグラムを動作特徴量として用いている。

方向ヒストグラムは、まず図1に示すように画像中の注目画素点の動きベクトル（大きさと方向）を求め、方向別に分類する。画像を構成する画素が格子状に配列されていることから、図1(b)に示すように方向分割数を8と考え、各動きベクトルを8方向に分類、方向ごとに動きベクトルの大きさの和をとって得られる方向ヒストグラムを作成し、動作特徴量とした。

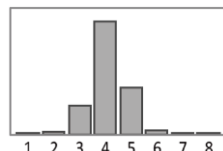
図1(a)の例では、右下方向から左上方向への動作ベクトルが多いため、方向4が大きい値となる方向ヒストグラム（図1(c)）が生成される。作業等の映像データから動作を分割する考え方や動作特徴量の抽出方法等、詳細については、過去の報告を参考されたい^[4-6]。



(a) 取得画像とそのオプティカルフローの例



(b) 方向の8分割



(c) 方向ヒストグラム

図1 方向ヒストグラムの例

IEの分野では、仕事のレベルが階層的に表現され解析される^[2]。動作解析を行うにあたって、図2に示すように仕事のレベルを3つの階層（単位工程層、作業層、動作層）に分けて考えている。

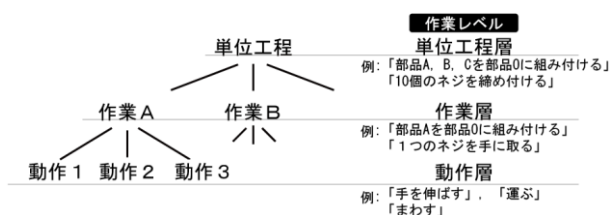


図2 作業の階層構造

単位工程層は、1つの作業場において「部品A、部品B、部品Cの順に部品Oに組み付ける」、「10個のボルトを締め付ける」等の1つの組み付け部品に対して行う一連の作業を意味する。作業層は、「部品Aを部品Oに組み付ける」、「部品Bを部品Oに組み付ける」等の目的行動の最小単位であり、最下層の動作層は、「手を伸ばす」、「運ぶ」、「まわす」等の基本的な動作である。

動作解析では、図3に示すように1つの単位工程に対して撮影した映像を画像処理により動作層の動作単位に分割することで単位工程を動作層で記述する。

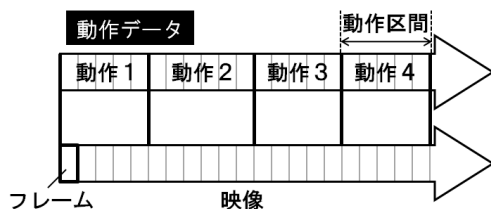


図3 作業と映像の分割

3. 3次元空間への拡張と時間の自動計測

前章で述べた動作計測・解析技術は、2次元平面の作業領域に対する動作にしか対応できない。さらに、作業

工程ごとに要する時間を自動計測することができない。

作業の対象領域を2次元平面から3次元空間に拡張することにより、作業領域が拡大化・複雑化している作業現場への適用範囲が広がると考えられること、また作業工程に費やす時間を自動計測することにより、限られた生産投入資源である人的労力を割くことなく工程能力の算出や作業の効率化を図るための情報を取得することが可能となる。

3次元空間の動作解析を実現するためには、従来の2次元平面における方向ヒストグラムを用いた動作特徴量（方向と大きさ）のみでは不可能であり、3次元空間の情報を取得するための撮影方法（装置）及び動作計測・解析手法を検討する必要がある。

複数台の撮影装置を用いる方法が考えられるが、ハードコストの増加や作業対象領域（撮影領域）の位置決め、撮影同期の調整等に手間を要する問題がある。

そこで本研究では廉価かつ簡単な機器構成を考慮し、図4に示すようなKinectセンサ（Microsoft社製）を候補として選考した。Kinectセンサは1台で画像及び距離（深度）データをリアルタイムに取得することが可能であることから、2次元平面の画像情報に加えて人体までの距離情報を同時に取得することが可能である。動作の認識範囲（奥行）は室内において800mm～3,500mmであり、センサ本体の価格は約1万5千円である。



図4 Kinectセンサ

Kinect センサは人の位置や動き等も認識することができるが、パソコンと Kinect センサを接続し制御するためには元々公式のドライバ等が公開されていないためオープンソースや無料のドライバを利用する必要がある。パソコンから Kinect センサを制御し、画像及び距離データを取得するためのプログラムは自作する必要がある。

本研究では、オープンソースであるOpenNI（Kinect開発元が提供するドライバ・ライブラリ）を利用した。OpenNI は、Windows XPやVisual Studioの旧バージョンにも対応しており利便性を有している。

Kinect センサの距離計測精度を確認するため Kinect センサから壁平面までの距離を計測した。全画素（画像サイズ：640×480pixel）について平均（Average）と分散（Variance）を求めた結果、Kinect センサー壁面間距離が

約 1,000mm の場合において平均 994.6mm, 分散 54.3mm という結果であった。距離計測精度としては良好な結果であると思われる。

4. 動作特徴量抽出手法の検討

Kinectセンサから取得した距離データを用いて3次元空間における動作計測・解析に拡張するための手法について2通りの検討を行った。

4. 1 最小距離（深度）の参照

1つ目の手法は、Kinectセンサから取得した距離情報（Depthマップ）から作業領域における最小距離を参照するものである。具体的には、Kinectセンサから取得したDepthマップに関して、フレームごとに距離の最小値を抽出し、フレーム間差分を計算する。そして動作単位ごとにフレーム間差分の和を求め、この数値を2次元平面とは別次元（距離方向）の動作特徴量として扱う。

一方、2次元平面の作業領域における動作計測・解析については、KinectセンサからDepthマップと同時に取得したRGB画像を参照することで行う。具体的には、Kinectセンサから取得したRGB画像に関して、映像の連続する2つのフレーム画像についてオプティカルフローを検出する。得られた方向ベクトルを8方向に分割し、動作単位ごとに各方向のベクトル量の和を計算する。この数値を2次元平面における動作特徴量として扱う。さらに動作単位に分割する際に時間を抽出し、動作単位ごとに時間を出力する。

そして、予め標準作業手順として登録した動作特徴量と評価作業の動作特徴量を比較することにより、動作単位ごとに作業の種類及び時間を出力する。2次元平面における動作特徴量の比較は、登録作業と評価作業の動作単位ごとに動作特徴量（8方向ベクトル）の類似度を余弦で求め、閾値処理を行う。距離に関する動作特徴量の比較は、登録作業と評価作業の動作単位ごとに動作特徴量（最小距離のフレーム画像間差分和）を求め、閾値処理を行う。

動作解析のフローを図5に示す。

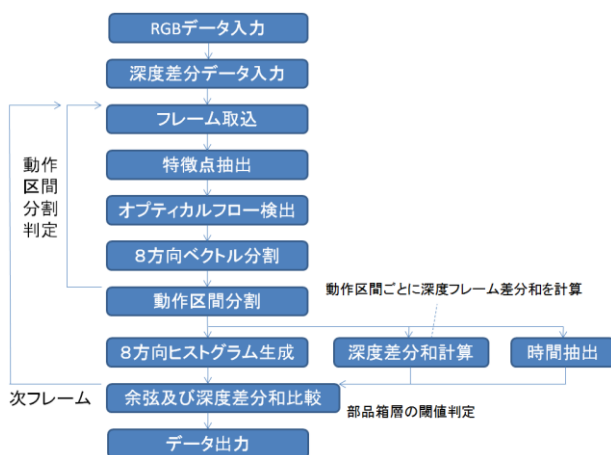


図5 動作解析フロー（最小距離の参照）

4. 2 特徴点の参照

2つ目の手法は、Kinectセンサから取得したRGB画像に関してオプティカルフローを検出する際に、特徴点の位置（座標）からDepthマップを参照することで距離情報を取得するものである。

具体的には、図6に示すように映像の連続する2つのフレーム画像からオプティカルフローにより特徴点の位置（座標）を抽出する。次に、KinectセンサからRGB画像と同時に取得したDepthマップにおいて特徴点座標に合致する座標の距離情報を取得する。

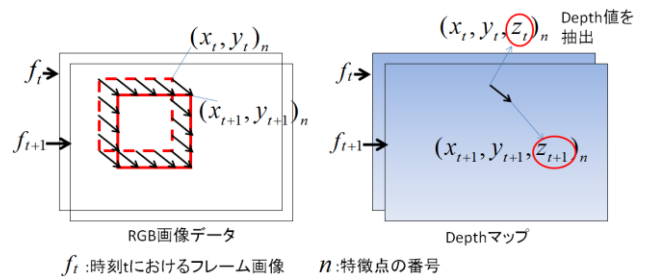


図6 特徴点の距離（Depth）データ参照

次に、すべての特徴点について動作単位ごとにフレーム間の距離差分の総和を算出する。この数値を2次元平面とは別次元（距離方向）の動作特徴量として扱う。

2次元平面の作業領域における動作計測・解析については前節と同様であるため省略する。距離に関する動作特徴量の比較は、登録作業と評価作業の動作単位ごとに動作特徴量（特徴点距離のフレーム画像間差分和）を求め、閾値処理を行う。

ただし、この手法は距離情報が特徴点の数に影響を受けやすいこと等の問題を有していることから、さらなる検討が必要である。

5. 実験

前章の検討を行った結果、フレーム画像の最小距離を参照する手法について有効性を検証するため、実験を行った。

まず、Kinectセンサを用いて3次元空間における動作計測を行うための作業環境を検討した。図7に示すようにセル生産等の作業現場において部品の組み立て作業等で用いられる作業架台を用意した。

Kinectセンサ、作業台、部品箱等の配置は図7の構成とした。作業者の手や腕が動く範囲を画像の注目領域として捉える方法を検討するため、Kinectセンサは作業者の前上方から作業台に向けて設置し、Kinectセンサから作業台までの距離は1,200mmとした。部品箱は上段と下段の2段に分類し、各段にはそれぞれ3つの部品箱を配置した。各部品箱の間隔は300mmとした。

従来の2次元平面における作業領域の動作解析では、「部品①を取りに行く」と「部品④を取りに行く」動作は

同じと判定されて評価できない問題が残されていたが、本研究ではこの問題を解消するものである。

作業領域における距離の最小値をKinectセンサから取得したDepthマップからフレームごとに抽出し、フレーム間差分を求める。この最小距離のフレーム間差分を部品箱（上段）と部品箱（下段）の区別を行う際の動作特徴量として扱う。

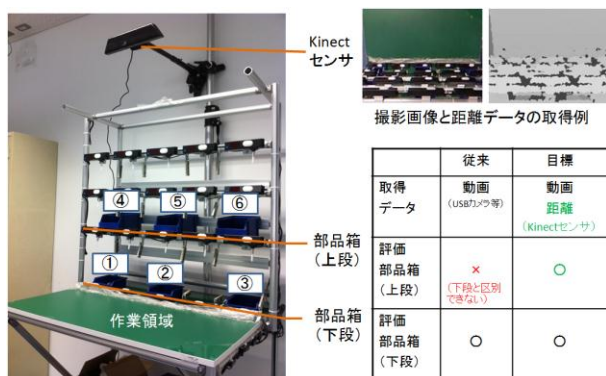


図7 作業領域とKinectセンサ等の配置

次に、KinectセンサからRGB画像及びDepthマップ（距離情報）を取得するための録画プログラムを試作した。開発環境は、OS：Windows7 Professional，統合開発環境：Visual Studio2008（C++），ドライバ：OpenNIを用いた。録画データの出力形式は、RGB画像をAVI形式，距離情報をCSV形式とした。

以上の環境において実験を行った。対象とした作業は、図7において「部品①を取りにいく」→「部品①をもってくる」→「部品②を取りにいく」→・・・→「部品⑥をもってくる」の作業（動作単位）を各部品箱について10回行った。

KinectセンサからDepthマップの各フレームの最小距離を取得後、動作単位（部品①を取りにいく等）ごとにフレーム間差分の和を計算した。結果は、部品箱（上段3箱）の平均196.6mm，分散21.4mmに対して、部品箱（下段3箱）の平均65.2mm，分散21.3mmであった。

部品箱（上段）と部品箱（下段）では、フレーム間差分の和（平均）に131.4mmの差が生じたことから、閾値処理による部品箱（上段）と部品箱（下段）の区別は可能であると考えられる。

なお、部品箱（上段3箱）の平均196.6mmは各部品箱の間隔を300mmとした割にやや低い数値と思われるが、これは「部品①を取りにいく」時点で作業領域に手を置いているため、手甲の最小距離を取得しているためである。また逆に、部品箱（下段3箱）の平均65.2mmはやや大きい数値であると思われるが、これは「部品①を取りにいく」過程で手がやや浮き上がる動作となることに起因している。

6. まとめ

セル生産等の作業現場における経済的かつ生産性（作業効率）等を高めるための作業カイゼンを支援する廉価かつ簡単な作業時間計測・解析ツールの開発及び作業評価領域に関して2次元平面から3次元空間への拡張を目標とし、動作計測装置及び動作計測方法の検討を行い、その候補として、装置1台で画像及び距離データをリアルタイムに取得することが可能なKinectセンサに注目し、その特性を調査した。

Kinectセンサの距離計測精度を調査したところ、良好な結果を得たことから、Kinectセンサを用いて3次元空間の作業評価を行うための動作特徴量抽出手法について2通りの検討を行った。その検討をふまえて、Kinectセンサから取得したDepthマップ（距離情報）から最小距離を参照する手法について有効性を検証するため、作業環境を構築したうえでRGB画像及びDepthマップの録画プログラムを試作し実験を行った。

実験の結果、動作単位ごとに部品箱（上段）と部品箱（下段）の区別が可能であることを示し、3次元空間において作業評価を行うための動作特徴量抽出手法として有効性を示した。

謝 辞

本研究への助言、御支援・御協力を頂きました皆様に感謝致します。

文 献

- [1] 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，2005.
- [2] 藤田彰久，“IE の基礎”，建帛社，1997.
- [3] 水野芳昭，“ムダの発見・排除によるヒト，モノ，カネの有効活用”，カイゼン推進研修，2010.
- [4] 清水早苗，平湯秀和，浅井博次，“映像の動作解析技術を用いた「ポカよけ」手法の研究開発—締め付け作業への適用—”，岐阜県情報技術研究所研究報告第10号，pp.1-6，2007.
- [5] 松原早苗，渡辺博己，棚橋英樹，“映像の動作解析技術を用いた「ポカよけ」手法の研究開発—汎用的な作業への拡張—”，岐阜県情報技術研究所研究報告第11号，pp.21-26，2008.
- [6] 曾賀野健一，渡辺博己，松原早苗，棚橋英樹，“映像の動作解析技術を用いた「ポカよけ」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第12号，pp.13-18，2009.
- [7] T.Kobayashi and N.Otsu, "Action and Simultaneous Multiple Persons Identification Using Cubic Higherorder Local Auto-Correlation", Proc.ICPR, 2004.