

Kinectを用いた作業分析システムの開発

渡辺 博己 生駒 晃大 棚橋 英樹

Development of Working Motion Analysis System using Kinect

Hiroki WATANABE 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、Kinectを用いた作業分析システムの構築を目指している。本研究では、昨年度開発した作業分析システムにおける適用作業の拡張を目的として、リスト型再帰性反射マーカを使用したロバストなマーカ領域検出技術を開発し、安定した作業分析が可能なシステムを開発した。マーカ領域検出技術においては、再帰性反射材の特徴を利用したマーカ領域の抽出技術と、マーカ色の判定技術を併用することで、マーカ領域と他領域とを区別する技術を開発した。また、作業分析システムにおいては、単なる作業分析ツールとしてだけでなく、トレーニング用途としても利用できるよう機能を拡張した。

キーワード カイゼン, 作業分析, Kinect, 再帰性反射材, マーカ検出

1. はじめに

1. 1 研究の背景

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、最初に取り組ま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、各作業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]。

こうした中、我々は、作業カイゼンにおける作業時間の自動計測を支援するために、画像処理技術を用いた作業分析技術の研究開発に取り組んでいる。本研究では、作業空間中の身体部位位置を特定することにより、作業を構成する動作の所要時間の取得を目的として、Microsoft社のKinect v2 (以下、Kinect) を用いた身体部位の検出技術を開発している^[3]。

昨年度は、組立工程における両手作業を想定して、距離画像から手部の形状特徴を抽出することにより、両手の位置を検出する技術を開発した。また、右手、左手それぞれに通過判定エリアを設定し、前エリアの通過時間から現エリアを通過するまでの時間を作業動作時間として計測するシステム (以下、既システム) を開発した。

1. 2 適用作業拡張の検討

通常、画像処理により身体部位を検出するためには、得られた画像中の領域を人物領域と非人物領域に分離し、人

物領域から各身体部位を検出する方法が一般的となっている。既システムにおいては、Kinectから得られる距離画像を利用することにより、カラー画像による検出方法に比べて、照明変動に強く、作業者の服装の変化にも影響を受けにくい身体部位の検出技術を実装している。しかし、作業現場への身体部位検出技術の適用において、2つの技術的な課題と、1つの運用上の問題があった。

1つ目の技術的課題は、人物領域の検出方法である。検出処理では、距離画像における背景差分法を用いて、作業者がいない状態で作業セルの背景画像を予め取得しておき、作業中の距離画像との差分から変化領域を検出し、最も大きな領域を人物領域とした。この方法を実際の組立作業等に適用すると、非人物領域が変化した場合、その領域が人物領域と重なると、同一領域として検出される。そのため、既システムを適用できるシーンは、非人物領域が変化領域として検出されない作業に制限する必要がある。

2つ目は、手部領域の検出方法である。手部は、身体部位における端点であることを利用し、RRC^[4]におけるリーチ長により、距離画像を用いた端点モデルを構築することで、人物領域より手部領域を得ていた。しかしながら、この方法を実際の組立作業等に適用すると、肘関節を屈曲すると屈曲部が端点として検出されたり、電動ドライバ等の工具を把持すると工具の両端が端点として検出されたりする。そのため、既システムを適用できるシーンは、手部領域が必ず端点となるような作業に制限する必要がある。

既システムの性能評価のための実験環境では、Kinectを作業者の頭部上方に設置した。この時、左右の手の判定は可能であったが、実際の作業現場では、必ずしも実験環境と同様な位置にKinectを設置することはできない。そのため、既システムの実作業を対象とした検証実験においては、

頭部位置が固定される座位作業を対象に、左右の手は交差せず、左右の手は隠れない作業条件となる作業を対象として、画像中の右側の端点は右手として、左側の端点は左手とみなしていた。

これらの制限にとらわれない画像処理方法として検討したのが、マーカの利用である。マーカを検出することで、座位・立位作業の制限だけでなく、身体の回転、頭部の移動、手部の交差・隠れ等の作業動作に対する制限、及び作業セル上の物の移動、部品の形状変化等の作業環境に対する制限等を排除できるため、適用作業の範囲を大きく拡張することが可能である。ただし、単純なカラーマーカを使用したのでは、照明変動に対するロバスト性が低くなる。そこで、Kinectで距離画像を取得するために使用されるのが赤外線カメラであることに着目し、モーションキャプチャで使用される赤外線マーカを使用することにした。

本稿では、マーカ領域検出技術を開発し、これらの制限のもとに行われる作業への適用を図った。また、開発したマーカ領域検出技術をシステムに実装し、作業動作時間の計測や動作状況等を分析するシステムを開発した。

1. 3 対象作業の概要

実験の対象とした作業は、産業用機器における放熱板の組立作業で、図1に作業セルの様子を示す。作業セルには多くの部品が配置され、作業はこれらの部品を図中央付近の放熱板に組み付ける立位作業であり、一連の作業は多数の左右の手の動作により構成されている。作業指示書の画面表示例を図2に示す。作業指示書は、今後、変更される計画であるが、現在11枚から構成され、多能工スキルの必要な作業内容となっている。図1, 2に示すとおり、作業では、放熱板を立てたり、倒したり、回転したりしながら部品が組み付けられ、作業環境だけでなく、組み付け時の身体方向、及び頭部位置も頻繁に変化する。

システムの開発にあたっては、事前にプロトタイプモデルを試作し、必要な機能を調査した上で開発を進めた。調査の結果、システムに要求される機能としては、分析ツールとしての機能は勿論、トレーニング用途としても利用できるように、作業者の熟練度に応じた評価項目の設定機能が必要であることが分かった。また、作業指示画面の切り替えにおいて、現状ではマウスのクリック操作が必要となり、作業が中断する。そのため、手を止めずに一連の作業が完遂できるよう、作業指示画面の自動切り替え機能が必要であることが分かった。本稿では、これらの要望を踏まえ、必要となる機能をシステムに実装した。

2. マーカ領域検出技術の開発

2. 1 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、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



図1 対象作業における作業セルの様子

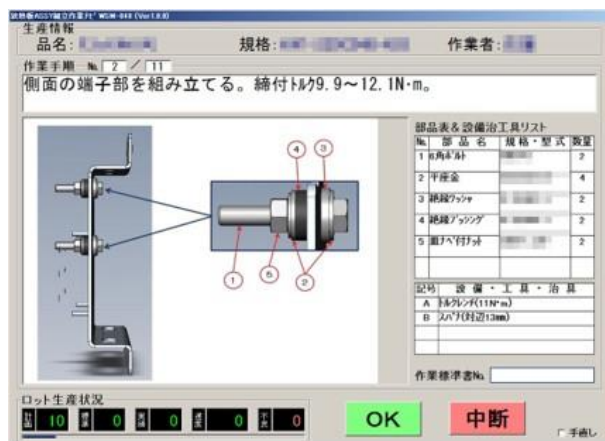


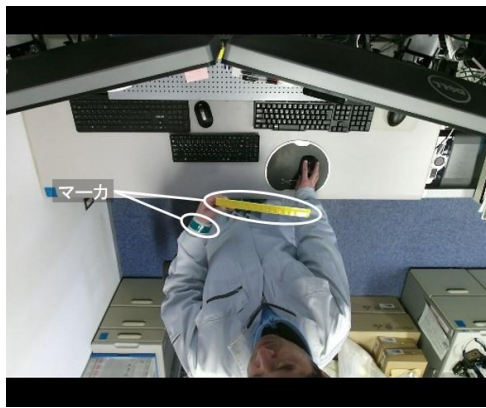
図2 作業指示書の画面表示例

取得するための赤外線カメラが装備されており、本研究では、赤外線画像からマーカ領域を取得することにより、マーカ抽出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。

図3にマーカ撮影時のカラー画像と赤外線画像を示す。図3(b)のK, Lがマーカ領域である。マーカ以外の高輝度領域について、画像上部の領域(A~H)は、金属部品が反射したものであり、上部中央の領域(I, J)は、カメラからの距離が近い領域である。また、画像下部の小さな領域(M)は、服に縫い込まれた反射材である。なお、図3は、取得画像の元の解像度が、カラー画像は1920×1080、赤外線画像は512×424であるため、表示のために解像度、及び画像サイズを調整している。

2. 2 マーカ領域の検出

抽出したマーカ候補領域からマーカ領域を検出するため、まず、候補領域の輪郭線を抽出し、直線近似可能な輪郭線を求め、輪郭線数が4となる矩形領域を選別した。図4に、図3(b)における輪郭線の抽出結果を示す。A~C, G, Lが候補領域として選出され、残りの領域については、輪郭線数が4以外であった。なお、Cは領域が小さいため、4以外となる場合がある。ここで、画像処理にはOpenCVを利用しているが、輪郭線の長辺と短辺の差が大きい矩形については、直線近似で設定したパラメータにより、輪郭線数が4とならないことが実験により得られている。



(a) カラー画像



(b) 赤外線画像 (A~Mは高輝度領域)

図3 マーカ撮影時の取得画像

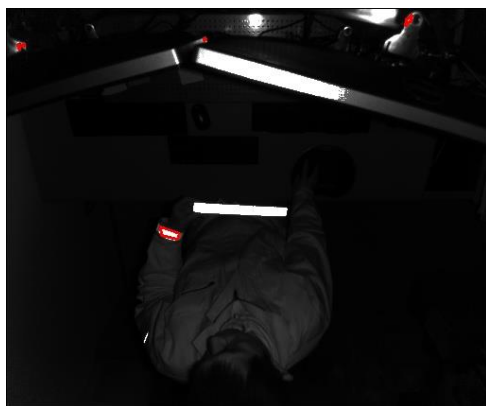


図4 マーカ候補領域における輪郭線の抽出結果

次に、輪郭線数が4となる矩形領域について、領域の色を判定するため、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た。Kinectにおいては、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値に基づいて算出される。しかし、図5に示すとおり、輝度値の高い画素については、距離画像におけるDepth値が求められないため、画素の位置をカラー画像上に再現することができない。そこで、図6に示すように、矩形領域において長辺と短辺を求め、矩形領域の中心点から長辺と垂直となる2つの方向に、短辺の長さの定数倍の長さとなる位置に参照点を求め、2つの参照点それぞれについて、カラー画像における対応画素位置を取得し、それらの中心画素を矩形領域のカラー画像における対応点とす



図5 マーカを撮影した時の距離画像

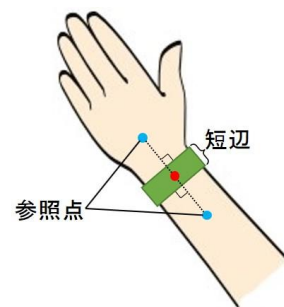


図6 参照点の抽出方法

ることにした。図7に赤外線画像における参照点の抽出例を示す。なお、この処理については、リスト型マーカを手首（腕）に取り付けることを想定しており、長辺側に参照点を求めることにより、参照点がマーカ領域と連続した領域となる手部、若しくは腕部上に存在することを前提としている。

最後に、矩形領域の中心付近の色に基づいてマーカ領域の検出を行った。マーカ領域色の判定においては、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（H）のみを用いて基準色と比較した。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内であれば該当マーカの領域色であると判定した。図8に、色の異なるマーカを両手首に装着した時のマーカ領域の検出結果を示す。検出結果では、マーカ領域色と同系色の円領域をマーカ領域の中心点として示しているが、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8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る。また、基準色については、事前にマーカの色相値の分布を求め、上限値、及び下限値をしきい値として決定する。

3. 作業分析システムの開発

3. 1 作業分析システムの概要

作業分析システムの開発にあたっては、既システムと同様に、両手（マーカ）位置を検出する通過判定エリアを映像中に複数配置し、エリア間の通過時間差を動作時間として分析する構成とした。ただし、既システムでは、作業指

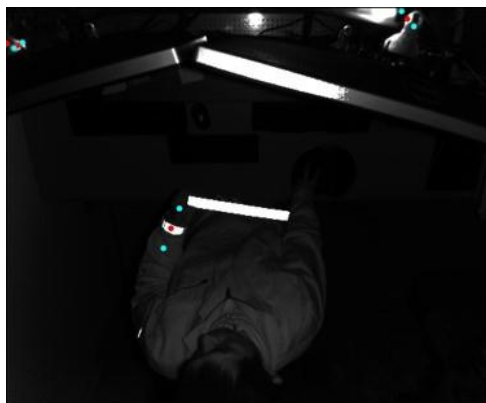


図7 赤外線画像における参照点の抽出例

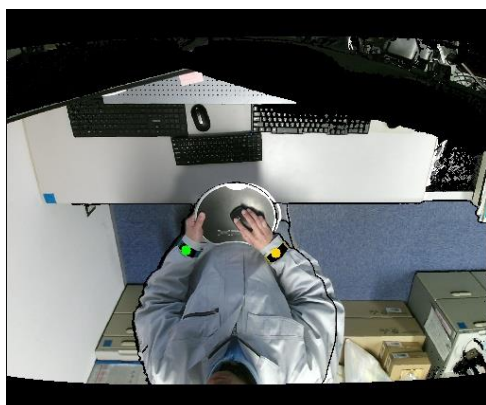


図8 マーカ領域の検出結果

示書が1枚から構成される比較的簡単な作業が対象であったのに対し、本システムでは、複数の作業指示書から構成される組立作業を対象としている。そのため、作業指示書に応じた通過判定エリアを自動的に切り替える機能をシステムに付加するとともに、多数の通過判定エリアの設定が容易に行える機能等を付加したシステムを開発した。

図9に開発したシステムの作業分析時の表示画面を示す。映像中の矩形枠が通過判定エリアであり、マーカが通過判定エリアに侵入することにより、検出マーカの状況を判定し、判定結果に基づいて右側のツリービューにおける最下層ノードの選択状態が下に遷移する。また、それと同時に、映像中には新たな通過判定エリアを表示し、次のエリアへの侵入を待機する。

開発システムにおける作業分析機能以外の機能としては、マーカ領域色の設定機能、エリア通過時の評価項目を含む通過判定エリア設定機能、及び作業分析結果の表示機能から構成されている。以下、各機能について述べる。

3. 2 マーカ領域色設定機能の開発

2. 2節で述べたとおり、マーカ領域の検出には色を利用している。しかし、色は環境光に左右されやすいため、環境に応じた設定が必要であることが知られている。そこで、作業現場で簡単にマーカ領域色を設定できるよう、マウス操作のみで設定が可能な機能をシステムに実装した。

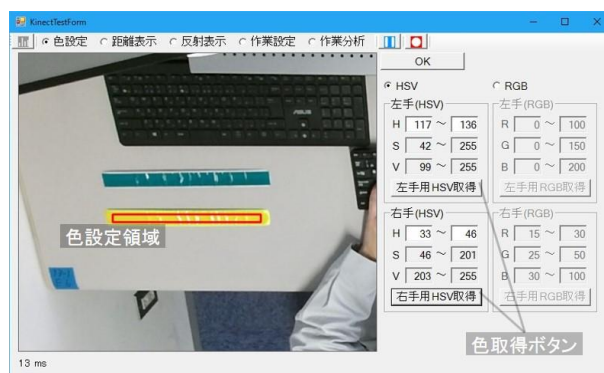
図10にマーカ領域色の設定画面を示す。マーカ領域色を設定するためには、まず、設定するマーカ領域を拡大表示



図9 開発した作業分析システムの表示画面



(a) 拡大表示領域の決定



(b) 色設定領域の決定

図10 マーカ領域色の設定画面

する領域を決定する(図10(a))。拡大表示可能な領域の大きさは固定であるが、領域枠内をドラッグすることで領域の位置を自由に変更することが可能である。拡大表示領域の位置が決まれば、色設定ボタンをクリックし、色設定領域を決定する(図10(b))。色設定領域については、領域右下をドラッグすることで大きさの変更が可能であり、領域枠内をドラッグすることで位置の変更も可能である。色設定領域の大きさ、位置が決まれば、右手、若しくは左手用の色取得ボタンをクリックし、検出対象マーカ色を決定する。OKボタンをクリックすると、マーカ色の設定値がシステムに記憶されると同時にファイルに書き込まれ、次回システム起動時にも設定値が読み込まれる。なお、マーカ色の設定値については、HSV表色系、あるいはRGB表色系を選択することが可能であり、RGB表色系を選択した場合は、3つの値を評価してマーカ領域を検出する。

3. 3 通過判定エリア設定機能の開発

通過判定エリア設定画面を図11に示す。画面は、作業指示書における作業内容に応じた通過判定エリアを設定する映像表示部と、設定エリアを管理するツリービューから構成される。

通過判定エリアの設定は、映像表示部において、3. 3節の色設定領域と同様に、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可能である。なお、通過判定エリアは、細線の矩形枠で囲った検出対象領域内のみ設定することが可能である。

ツリービューにおいて、トップノードでは、作業種別、あるいは作業者の熟練度別に設定項目を管理できるようにした。これは、同一システムを使用した作業分析を行うことで、異なる作業間における作業時間等の定量的な評価を可能にするとともに、トレーニング用途としてシステムを用いた場合、熟練度に応じて設定内容を変更することで、作業者のスキル評価を可能にするためである。セカンドノードでは、作業指示書毎に設定項目を管理できるようにした。これにより、各作業指示書における作業動作終了のタイミングの取得が容易となるため、作業指示画面の自動切り替えを実現することが可能である。最下層のラストノードでは、作業指示書内の各作業動作を管理できるようにした。作業動作としては、通過判定エリアと判定時の評価項目を管理している。

マーカのエリア通過時の状況を判定する評価項目の設定画面を図12に示す。区分では、右手、左手、どちらか、両手の設定が可能であり、エリアに侵入したマーカ色を判定する。ファイル名は、エリア通過時の音を設定することが可能であり、作業者にエリア内を正常に通過したことを知らせる機能を付加するものである。

また、本研究では、図13に示すように、1つの動作には、作業品質を保証するために必要な動作時間が存在するはずであり、熟練度合いに応じて可変な動作時間と合わせて、1つの動作に要する時間を形成し、これらが連続することにより作業指示書における作業時間を構成していると定義した。滞留時間、及び制限時間については、各動作の必要動作時間、及び可変動作時間をそれぞれ滞留時間、制限時間として設定することにより、エリア内で滞留すべき時間や次のエリアへ遷移するまでの制限時間を評価し、通過判定エリア内における動作を判定可能にした。例えば、部品を取るだけの動作であれば、滞留時間は0に設定し、制限時間のみ設定すれば、部品付近に設定した通過判定エリアにマーカが侵入すると、即座に次のエリアに通過判定を遷移させ、次のエリアではマーカの侵入を待機させることができる。また、部品のネジ締め等の組付け動作であれば、滞留時間を数秒に設定すれば、組付け動作付近に設定した通過判定エリアでは、滞留時間内はマーカの存在を評価し続け、滞留時間経過後、次のエリアに通過判定を遷移させることができる。



図11 対象とする組立作業における作業セルの様子

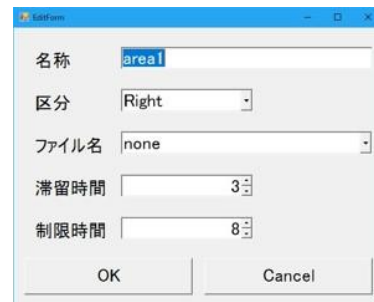


図12 通過判定評価項目の設定画面



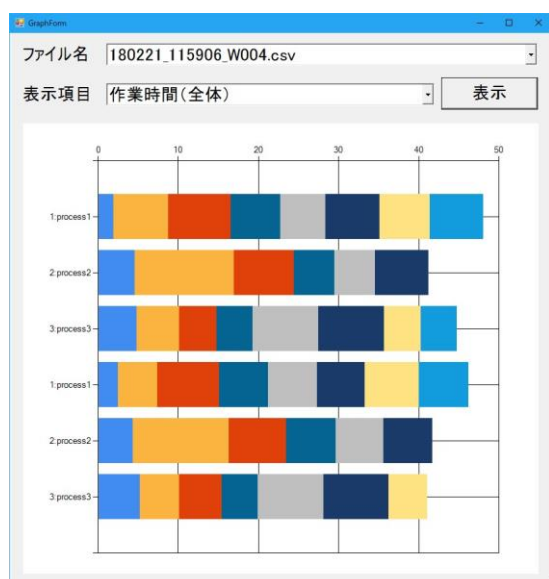
図13 作業時間の構成

なお、本システムでは、制限時間を超過すると通過判定エリアを点減させると同時に、超過した回数を記録することにより、トレーニング用途として利用できるようにしている。また、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、熟練度別の設定等を容易にしている。

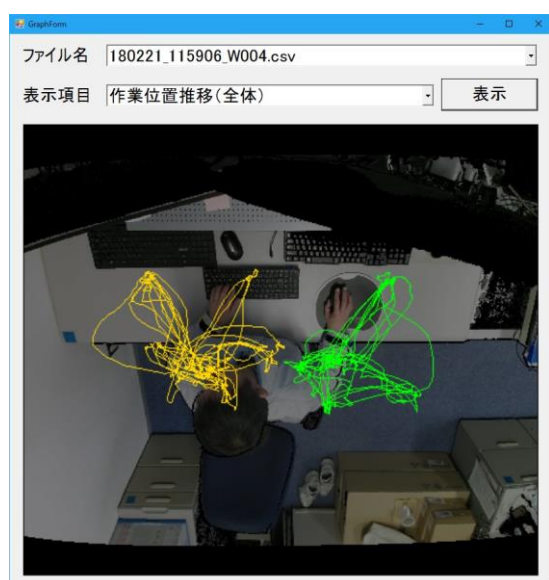
3. 4 作業分析結果表示機能の開発

作業分析結果としては、既システムと同様に、作業指示書毎の動作時間をグラフ表示することが可能である。しかし、グラフ表示は、通過判定エリア内におけるマーカの検出時間を可視化するだけで、通過判定エリア外の動作状況は分からない。そのため、検出対象領域内のマーカの全ての検出位置、時間を記録することにより、マーカの位置推移、位置分布を表示可能にした。

図14に、作業時間グラフ、位置推移、及び位置分布の表示例を示す。図については、約270秒の動作を30fpsのサンプリングレートで取得した映像の分析結果であり、マーカの検出率は、全フレームに対して左が約75%、右が約81%であった。得られた検出率は平均値であるが、1秒あたり22.5フレーム以上の画像でマーカを検出していることになるため、理論上約45msの時間分解能があると考えられる。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が36msであることから¹²⁾、時間差は僅かであると考えられ、良好な結果であると言える。なお、図14(b)では全ての検出位置を



(a) 作業時間グラフ



(b) 位置推移



(c) 位置分布

図14 分析結果の表示例

描画しているが、左右の軌跡が交差していないこと、独立した位置に直線で軌跡が描画されていないことから、検出ミスについては、左右の判定ミスも含めて0であったことが分かる。

4. まとめ

本研究では、作業カイゼンにおける作業時間計測を支援するために、Kinectを用いて作業の様子を撮影し、得られた映像から両手に装着したマーカを検出することで、作業時間を分析するシステムを開発した。

マーカ検出においては、マーカに再帰性反射材を使用するとともに、マーカの色を判別することで、ロバストな検出技術を開発した。実験環境においてマーカの検出率を求め、時間分解能として換算したところ、45msという良好な結果が得られた。なお、検出ミスについては、左右の判定ミスも含めて0であった。

また、作業分析では、取得した映像中にマーカの通過を判定するエリアを複数設定することで、エリア通過時間を作業の動作時間として計測する技術を開発した。動作時間については、必要動作時間と可変動作時間から構成されると定義することで、エリア内での滞留時間と次のエリアに遷移するまでの制限時間を設定可能にし、トレーニング用途としても利用できる技術を開発した。

今後は、作業現場でシステムの検証実験、計測結果の評価実験を行い、システムの有効性を検証する予定である。また、他の作業に対しても実験を行い、開発システムの汎用性を高めることを検討する。なお、Kinectについては、Microsoft社より生産を終了することが発表されており、代替センサについて検討する必要がある。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、開発システムの試行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。

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, Vol.9, pp.20-23, 2005.
- [2] 藤田彰久, “IEの基礎”, 建帛社, 1997.
- [3] 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] 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.