

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 —

松原 早苗 渡辺 博己 棚橋 英樹

Research of Failsafe Camera System using Motion Analysis

- An Extension of Versatile Work -

Sanae MATSUBARA Hiroki WATANABE Hideki TANAHASHI

あらまし 製造現場において、消費者ニーズの多様化による頻繁な製造品種の切り換えに柔軟に対応するため、人手による作業が増加している。しかし、人の作業において「作業忘れ」や「作業間違い」といった作業ミスは不可避であり、このミスに起因する不良を早期に発見し、市場や後工程に流さないことが大きな課題とされている。このような課題を事前に予防する対策のことを、一般に「ポカよけ」と呼ぶが、本研究所では平成20年度より、カメラから取得した映像中の作業者の動作をリアルタイムに解析し、作業ミスを高い信頼性で検出する、新しい「ポカよけ」手法の研究開発に取り組んでいる。今年度は、提案「ポカよけ」手法を、昨年度対象とした「締め付け」作業等の単純な反復作業から、複数の独立した動作の組合せからなる汎用的な作業に適用できるよう拡張し、検証実験を行った。その結果、従来手法と比較し信頼性の高い作業ミス検出が可能であることを確認した。また、作業者の変更に対しても個人差の影響を受けにくいことを確認した。

キーワード ポカよけ、動作解析、作業分析、異常検知、インダストリアルエンジニアリング(IE)

1. はじめに

自動車や家電などの製造現場では、製品の品質や生産性を向上するために、製造技術や製造機械の高度化が強く進められてきた。しかし近年は、大量生産から多品種少量生産への移行や製品サイクルの短期化等の激しい変化に対応する必要があるため、設備投資が追いつかず、十分な設備の確保が困難な状況になりつつある。そこで、このような需要の変化に対応した作業環境を確保するため、柔軟性の高い人手を多用する現場が増加している^[1]。しかしながら、人が行う作業には、「作業忘れ」や「作業間違い」といった人為的なミスによる不良の発生が避けられないといった課題がある。万が一、品質を満たさない不良品が市場へ流出した場合は、消費者に多大な迷惑がかかることはもちろん、企業も信頼を失い、企業の存続に関わる大きな問題となる^[1]。そのため、人為的な作業ミスによる不良品が消費者や後工程へ流れることを無くす、もしくは少なくするための対策は非常に重要性が高く、多くの取り組みが続けられており、さらなる向上が求められている。

そこで本研究所では、平成20年度より、岐阜県の主要産業である製造業を対象として、この人為的な作業ミスをさらに信頼性高く検出する「ポカよけ」手法の研究開

発に取り組んでいる。組立後の部品を検査する従来手法に対して、本手法は、組み立てる作業者の動きの過程をリアルタイムに評価することで、作業ミスの早期検出、検出の信頼性向上を可能とすることを特徴としている。

昨年度は、「締め付け」作業等の単純な反復作業を対象として、作業ミスを検出する手法の開発を行った。そして、実際の自動車の組立工程におけるネジの締め付け作業に適用し、有効性を確認した^[4]。今年度は、昨年度対象とした単純な反復作業から、複数の独立した動作の組合せからなる汎用的な作業に適用できるよう手法を拡張し、実験によりその手法の有効性を検証した。

2. 作業ミス検出手法の概要

2.1 従来手法の課題

製造現場では作業ミスを検出することは重要性が高く、多くの取り組みがなされている。

これらの取り組みは、各作業工程の後に検査工程を設け、部品（製品）の機能や外観から作業ミスを検出する方法と、作業工程内で行われる個々の作業の過程で起きる事象（例えば、工具のトルク情報や部品数の因数管理等）から作業ミスを工程内で検出する方法の大きく2つに分かれる。

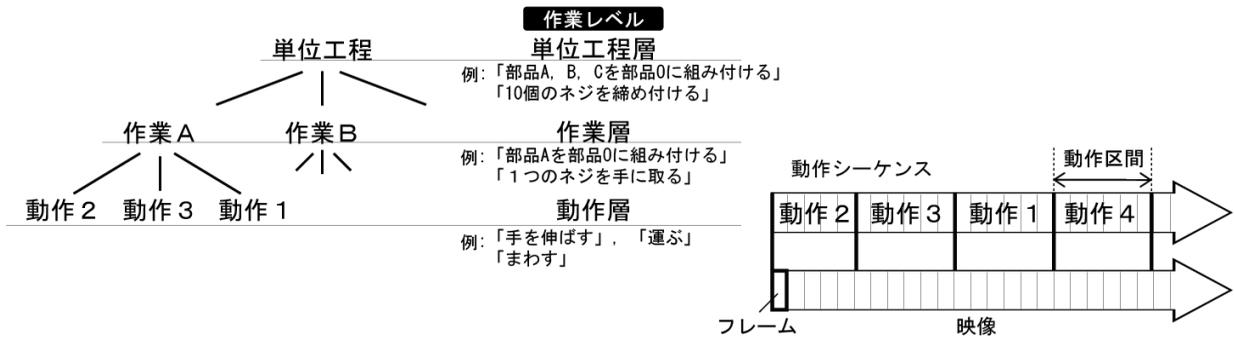


図1 作業と映像の階層構造

前者の方法では、検査工程による工数増が避けられないため多用すると生産性の低下が問題となり、一般的には、一連の製造工程の最終段階や中間で検査工程が設けられることが多い。そのため、不良が発見された場合、後もどり工数の増加や破棄される部品（製品）の増加による損害が大きくなる問題がある。

一方、後者の方法は、工数の増加が不要であり、作業工程内で作業ミスを検出することができる。その方法として、ポカよけがある。ポカよけとは、部品の取り付け忘れ等の「うっかりミス」や部品を間違えて付けてしまう等の「ポカミス」を避ける仕組みのことである。具体的な例としては、作業者が複数の部品箱から間違えず指定部品をピックアップできるように、指定の部品箱のみLEDを点灯させ作業の指示を行う装置や、その部品箱に手を入れたことを確認する光電スイッチを用いた動作確認センサ、また、作業の回数や部品の個数を工具やセンサで計測し、標準作業と異なる場合に作業ミスが発生したとして知らせる装置等がある。しかし、例えば、指定の部品箱に手を入れたことが確認できても、その部品を落としたり、別の場所へ置き忘れてすることにより、部品の取り付け忘れが発生する場合がある。このように、部品箱の挿入口の光電スイッチやトルクレンチの締め付け完了信号等、ある一時点での動作を検出するセンサ情報のみでは作業全体の品質を十分に保証できない問題がある。

2. 2 提案手法の概要

本研究では、製造現場で既に使用されている前述のセンサ情報に加え、カメラを用いて作業者の動作を連続的に評価することで、作業ミス検出の信頼性を高めるポカよけ手法を提案する。製造現場では、作業者が変わっても、作業の品質を保つため、工程ごとに作業の内容とその順序を定めた作業手順書が作成されている。この作業手順が定められていることを利用し、予め正しい作業として登録した作業映像と、リアルタイムに取り込まれる作業映像とを比較する画像処理技術を開発することで作業ミスを検出する。

2. 3 作業の構造と記述

従来から、作業改善や作業設計を目的とした作業分析は、インダストリアル・エンジニアリング (IE) と呼ばれる工

学的手法が用いられている^[2]。その中では、仕事のレベルが階層的に表現され分析される。本稿では、図1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）に分けて説明を行う。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」等の意味ある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。

本研究では、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。

2. 4 システム構成

人の動き情報を取得する手法として、モーションキャプチャシステムを用いる手法があるが、マーカの装着が必要である等の作業者への拘束や、複数台のカメラを用いた高価で複雑な機器の導入が必要となる。そこで本研究では、作業者への拘束を必要とせず、現状の作業環境に簡単に追加構築ができるよう、作業を撮影する1台のカメラと、画像処理による作業ミス検出処理を行う1台のPCという安価かつ簡単な機器構成とした。

ここでは、作業者の手や腕が動く範囲を注目領域として撮影するため、カメラは作業者の前上方から作業台に向け設置した。

3. 動作シーケンスの獲得と作業ミスの検出

作業台上において手と腕で行う作業を対象とし、作業映像を解析することで、作業ミスを検出する処理について述べる。

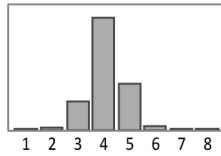
まず、作業映像を構成する各フレームから動きの大きさと方向分布を表わす動き特徴量を抽出し、その時系列データの変化から作業映像を動作単位に分割する。次に、1つの動作単位に対する開始フレームから終了フレームまでの区間を動作区間と定義し、この動作区間の動きの方向分布を表す動作特徴量を求める。そして、動作区間とその動作特徴量の時系列データである動作シーケンス



(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2 方向ヒストグラムの例

を獲得する。作業ミスは、予め登録した正しい作業の動作シーケンスとリアルタイムに獲得される動作シーケンスとを比較評価することで検出する。数式等詳細については、昨年度の報告^[4]を参考にされたい。

3. 1 動き特徴量の抽出

本手法では、従来の顔や手などの注目部位を切り出す手法に対して、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^[3]をとる。具体的には、局所的な動きベクトルとしてオプティカルフローを用い、その統計量である動きの大きさと方向分布を表わす方向ヒストグラムを動き特徴量として用いる。方向ヒストグラムは、まず、図2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。本稿では、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2(b)に示す

ように、方向分割数を8とした。各動きベクトルを8方向に分類し、方向ごとに動きベクトルの大きさの和をとる。得られる方向ヒストグラムの例を図2(c)に示す。図2(a)では、右下方向から左上方向への動きベクトルが多く、得られるヒストグラム（図2(c)）も方向4が大きい値となっている。

3. 2 動作単位の分割

作業映像における動作単位と動作単位の切り替わりの点を分割点として検出することで、作業映像を動作単位に分割する。

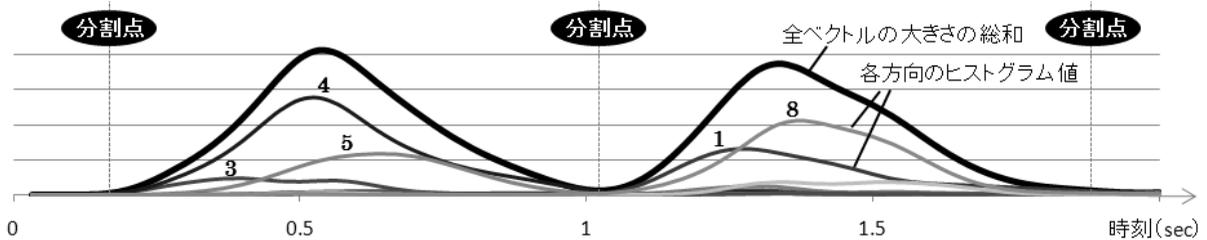
本手法では、作業における動作単位を始点と終点を結ぶ無駄のない動きと仮定することで、対象とする手の動作は、必ず「静止状態から速度を上げ、ある地点で速度が減少し静止する」という過程をもつことを利用する。そこで、図3(a)に「静止」→「手を伸ばす」→「手を戻す」→「静止」という映像の例を示す。そして、この映像から抽出した全ベクトルの大きさの総和（太線）の時間変化を図3(b)に示す。大きさの総和は、動作の開始とともに動きが大きくなり、動作の切り替わり時点で小さくなるのがわかる。そのため、ここでは、全ベクトルの大きさの総和が減少から増加する時点を分割点として検出する。

3. 3 動作特徴量の抽出

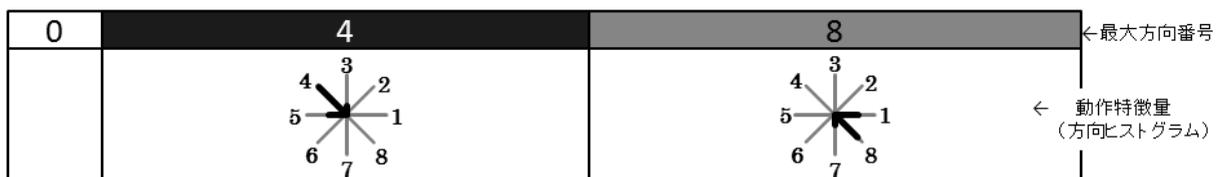
2つの分割点間を1つの動作単位を構成する動作区間とする。また、この動作区間の動作特徴量は、区間全体の動きの方向分布を表わす方向ヒストグラムとし、区間を構成する各フレームの動き特徴量（方向ヒストグラム）から求める。動作特徴量は、動作区間内の各フレームの方向ヒストグラムを、方向ごとに積算し、全ベクトルの大きさの和で割ることで算出する。図3(c)に、図3(b)の分割結果と動き特徴量の時系列データから算出される動作特徴量とそ



(a) 作業映像例（「静止」→「手を伸ばす」→「手を戻す」→「静止」）



(b) 全ベクトルの大きさの総和と方向ヒストグラムの時間変化



(c) 動作シーケンス（動作特徴量）

図3 映像の分割と動作シーケンスの獲得

の最大となる方向の番号を記号として示す。全ベクトルの大きさの総和が小さく、動きがないと判断された区間は、記号0とした。

3. 4 作業ミスの検出

作業ミスを、予め正しい作業として登録した動作シーケンスと、リアルタイムに取り込まれる作業の動作シーケンスとを比較することにより検出する。

動作シーケンスAは、動作区間の時系列データ $\{A_1, A_2, \dots, A_i\}$ ($i=1, \dots, n$)であり、各動作区間 A_i は、8方向の方向ヒストグラムである動作特徴量 $A_i=(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i8})$ をもつ。ただし、 i は動作区間の順番を意味する。

比較する2つの動作シーケンスをそれぞれA, Bとしたとき、同じ番号の動作区間 A_i と B_i の動作特徴量の類似度を順に求める。動作特徴量の類似度は、方向ヒストグラムをベクトルとして扱い、2つのベクトル $A_i=(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i8})$ と $B_i=(b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{i8})$ の余弦とする。値が1に近づくほど類似度は高くなり、0に近づくほど類似度は低くなる。その類似度に対して閾値処理を行い、閾値以下の場合、動作が異なると判定し、作業ミスとして検出する。実験では、経験的に閾値を0.85とした。

4. 実験

本章では、昨年度行ったネジの締め付け作業等の反復動作からなる作業だけでなく、独立した動作の組合せからなる汎用的な作業に適用できるように拡張した手法を実験により評価する。

本稿では、汎用的な作業の例として、1つのボルトにワッシャー(小)、ワッシャー(大)の2種類のワッシャーを順に入れ、1つのナットを手締めする作業に対して実験を行う。この作業は、実際の製造現場から、組立後に部品が重なり、ワッシャーの順序や欠如の確認が難しいという意見を受け、対象作業として採用した。

作業の流れは、「ボルトを治具にセットする」→「ワッシャー(小)を手取る」→「ワッシャー(小)をボルトに入れる」→「ワッシャー(大)を手取る」→「ワッシャー(大)をボルトに入れる」→「ナットを手取る」→「ナットをボルトに手締めする」→「ボルトを治具から外す」という流れである。複数の部品を部品箱から取り、治具にセットされたボルトに取り付ける作業であり、部品の「取り付け忘れ」や「取り付け順序の間違い」といったボカが発生する。現在、このような部品の組立現場では、各部品箱の前に光電スイッチ等のスイッチセンサを設置し、手が部品箱を通過することを確認するシステムが導入されていることが多い。このシステムでは、「ワッシャー(小)の部品箱通過」→「ワッシャー(大)の部品箱通過」→「ナットの部品箱通過」がこの順序で確認されない場合をボカとして検出している。しかし、このシステムでは、部品箱通過後、部品を落としたり、どこかに置き忘れたりした後、次の作業へ移った場合、取り付け忘れのボカを検

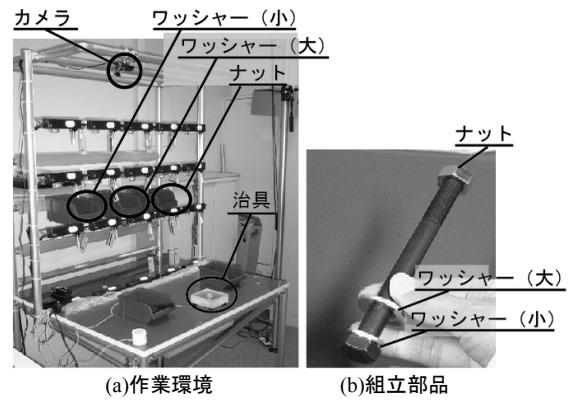


図4 作業環境における提案システムと取得画像例

出できない問題がある。また、ワッシャーの取り付け順序は、品質の重要な要素であり、一度に2種類の部品を手にする、取り付け時に順序が入れ替わる危険性がある。そのため、順序を間違えないよう「ワッシャー(小)を手取る」→「ワッシャー(小)をボルトに入れる」→「ワッシャー(大)を手取る」→「ワッシャー(大)をボルトに入れる」と1つずつ取り付ける作業を標準としているが、「ワッシャー(小)をボルトに入れる」動作を省いて作業される場合がある。しかし、このようなシステムでは検出できない問題がある。

本研究では、このような「部品箱Aを通過した」等のある一時点の動作を確認するセンサを用いた現状のシステムの問題に対して、「部品箱Aから治具まで部品を運ぶ」といった連続的な動作の評価を加えることで、信頼性の高いボカ検出を行う。

4. 1 実験条件

一般的な製造現場を想定して、セル型の組立作業環境を構築した。図4(a)に作業環境を示す。左から順に「ワッシャー(小)」、「ワッシャー(大)」、「ナット」の部品箱を配置し、ここでの組立作業を撮影した映像を作業データとして評価した。組立後の部品を図4(b)に示す。システム構成は、図4(a)に示すように作業に支障がなく、手や腕が動く範囲を中心に撮影可能な位置に設置したカメラ1台と、ボカ検出の処理を行う1台のPCとした。1つの作業データは、ボルトを治具にセットしてから、ボルトを治具から外すまでの作業に対する映像である。作業データは、非圧縮のカラー情報をグレースケールに変換して利用した。フレームレートは30fps、画像サイズは160pixel×120pixelとした。

作業データは、ボカを含まない正しい作業(以降、OK作業と呼ぶ)のデータ80件、ボカを含む作業(以降、NG作業と呼ぶ)のデータ12件の合計92件を用い、評価を行った。これらのデータは、作業者の変化の影響を評価するため、作業者4名がそれぞれOK作業20件、NG作業3件を行ったデータである。

ボカを含むNG作業データは、以下の3種類のシナリオとした。NGシナリオ2、NGシナリオ3は、従来のスイッ

チセンサのみでは検出できず問題となっていた状況を再現しものである。

<NGシナリオ1>

「ワッシャー (小) 」または「ワッシャー (大) 」を取り付け忘れる。

<NGシナリオ2>

「ワッシャー (小) を手に取る」の後、「ワッシャー (小) ボルトに入れる」を省き、「ワッシャー (大) を手に取る」を行い、2種類のワッシャーを一度にボルトに入れる。ワッシャーの順序が入れ替わる危険性があるNG作業。

<NGシナリオ3>

「ワッシャー (小) 」または「ワッシャー (大) 」を手に取り、落とすまたは人に話しかけられ、部品を別の場所に置き忘れ、次の作業へ移り、部品を取り付け忘れる。

4. 2 作業データの解説

図5に、OK作業データの動作シーケンスの例を示した。映像が、「ワッシャー (小) に手を伸ばす」→「ワッシャー (小) をボルトに運ぶ」→「ワッシャー (大) に手を伸ばす」→「ワッシャー (大) をボルトに運ぶ」→「ナットに手を伸ばす」→「ナットをボルトに運ぶ」の動作単位に分割されていることがわかる。

本来、動作シーケンスは、各動作区間に対して方向ヒストグラムを動作特徴量としてもつが、図では、スペースの

都合により、方向ヒストグラムの最大となる方向の番号の記号列として示す。また、ワッシャーをWと省略する。

図6に、NGシナリオ1のNG作業データに対する動作シーケンスの例を示した。「ワッシャー (小) に手を伸ばす」→「ワッシャー (小) に運ぶ」→「ナットに手を伸ばす」→「ナットをボルトに運ぶ」となり、「ワッシャー (大) に手を伸ばす」→「ワッシャー (大) をボルトに運ぶ」が抜け、「ワッシャー (大) 」の取り付け忘れが発生したことがわかる。

図7に、NGシナリオ2のNG作業データに対する動作シーケンスの例を示した。「ワッシャー (小) に手を伸ばす」→「ワッシャー (小) をもちつつワッシャー (大) に手を伸ばす」→「ワッシャー (小) とワッシャー (大) をボルトに運ぶ」→「ナットに手を伸ばす」→「ナットをボルトに運ぶ」となり、「ワッシャー (小) をボルトに運ぶ」を飛ばし、ワッシャーの順序が入れ替わる危険がある作業であることがわかる。このNG作業は、従来のスイッチセンサのみのシステムでは検出ができず問題となっていたが、動作シーケンスを評価することで検出可能であることがわかる。

図8に、NGシナリオ3のNG作業データに対する動作シーケンスの例を示した。「ワッシャー (小) に手を伸ばす」→「ワッシャー (小) をボルトに運ぶ」→「ワッシャー (大)

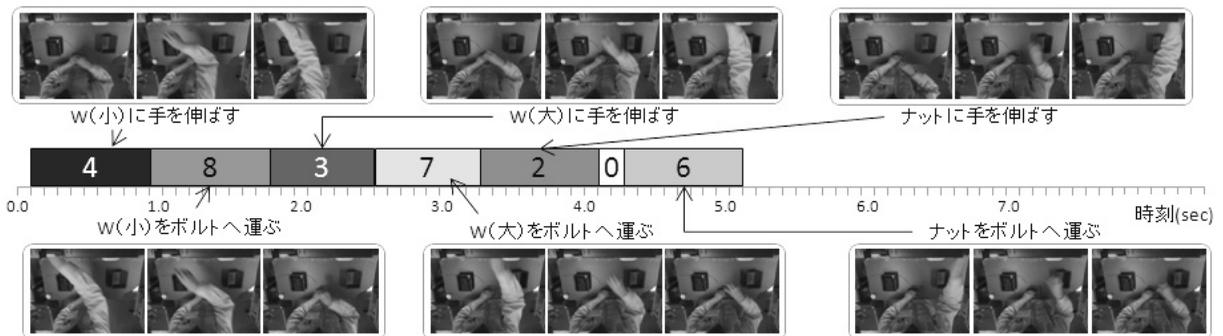


図5 OK作業データに対する動作シーケンス例

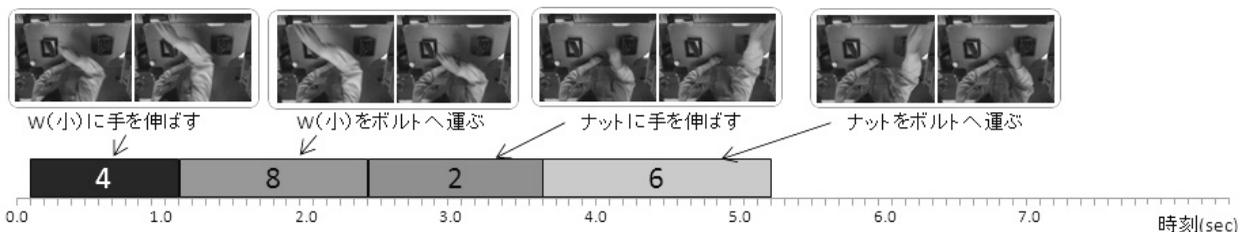


図6 NGシナリオ1のNG作業データに対する動作シーケンス例

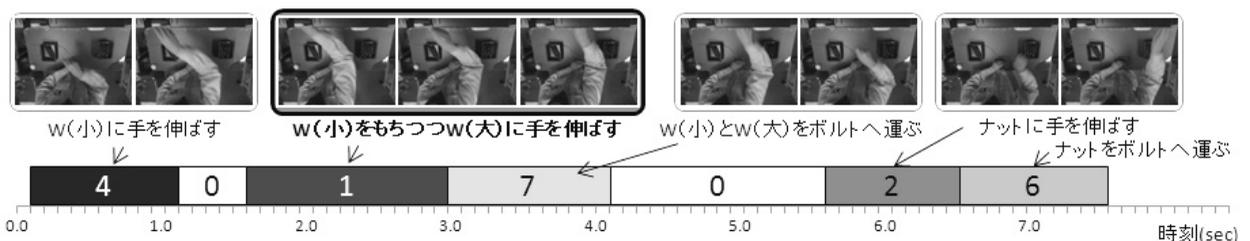


図7 NGシナリオ2のNG作業データに対する動作シーケンス例

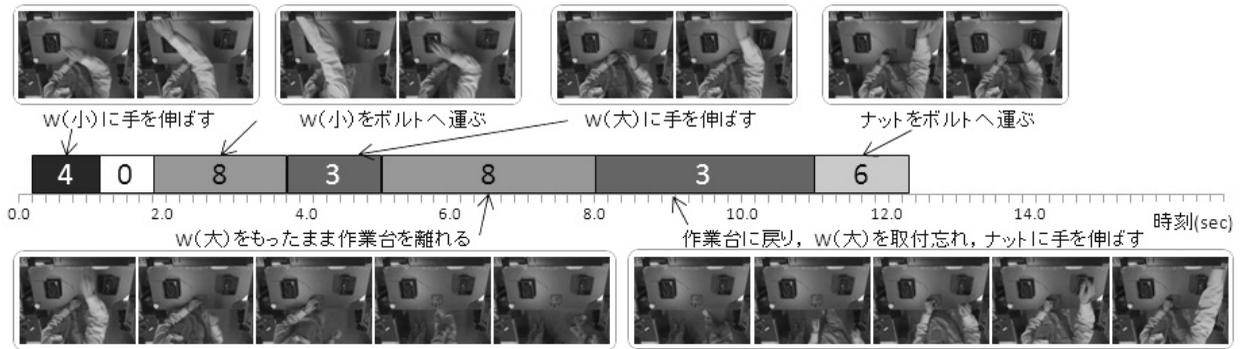


図8 映像の分割と動作シーケンスの獲得

に手を伸ばす」→人に話しかけられ「ワッシャー（大）をもったまま作業台を離れる」→「作業台に戻り、ワッシャー（大）を取り付け忘れ、ナットに手を伸ばす」→「ナットをボルトに運ぶ」となり、正しい作業と異なる動きが入ったことがわかる。このNG作業も、従来のスイッチセンサのみのシステムでは検出ができず問題となっていたが、動作シーケンスの評価を加えることで検出可能であることがわかる。

4. 3 ポカ検出の精度評価

正しい作業データの動作シーケンスを予め登録し、評価する作業データの動作シーケンスとの類似度に対して閾値判定することで、ポカ検出を行う。

ここでは、正しい作業として登録した動作シーケンスは、ある作業者の1つのOK作業データを用いた。そして、各作業者の予め正否がわかっている各作業データ（OK作業データ、NG作業データ）に対して、ポカ検出処理を行い、ポカを含まないOK作業かポカを含むNG作業かを判定し、評価する。ポカの未検出率、過検出率を評価する。判定した結果を表1に示す。作業映像が動作単位に正しく分割されたことは目視により確認した。

OK作業データ80件対して、76件がOK作業と正しく判定され、正解率は95%であった。4名の作業員別の正解率は、それぞれ90%、95%、100%、95%であり、作業員の個人差による影響は見られなかった。登録した動作シーケンスの作業員と異なる作業員でもポカ検出可能であることがわかる。ここでは、動きに対する評価しており、各動作の時間が異なっても正しく評価できることが、作業員の変化や動作時間のばらつきを吸収したと考えられる。動作シーケンスは、動作の時間の情報も含んでいるため、時間の評価も可能である。

OK作業データがNG作業と過検出された原因は、部品を落したり、部品を取り損ね2度部品箱に入れたりといった例外的な動きが入ったためであった。これらは標準作業として定められた作業から外れ、NG作業として判定され

るものである。部品の落下や部品の取り損ねは、ポカにつながる動作である。部品を取りやすい位置に部品箱を移すことや部品箱を変えるなど改善の材料となる情報になると考えられる。

NG作業データ12件すべてにおいてNG作業と正しく判定され、未検出率は0%であった。ポカよけシステムでは、ポカを含むNG作業が誤ってOK作業と判定され、不良が流れることは許されない。つまり、NG作業データがOK作業と誤判定される未検出率が0%であることが重要である。ここでは、従来のスイッチセンサのみを用いたシステムでは検出が難しいポカの検出も可能であることを確認した。

5. まとめ

製造業の組立工程における人の作業に対する品質の向上を目的として、カメラ映像を用い、作業員の動作を評価することで人為的な作業ミスであるポカを検出するポカよけシステムを提案した。昨年度行った「締め付け」作業等の単純な反復作業を対象とする作業ミス検出手法を、複数の独立した動作の組合せからなる汎用的な作業に適用できるように拡張した。また、実際の組立作業を想定した映像に対して実験を行い、従来のスイッチセンサのみを用いたシステムでは検出が難しいポカの検出が可能である結果を得た。今後は、実際の製造現場に適用し、提案手法の「ポカよけ」への有用性について検討を行う。

文献

- [1] 平野裕之, “品質保証と自動化”, 日刊工業新聞社, 2001.
- [2] 藤田彰久, “IE の基礎”, 建帛社, 1997.
- [3] T.Kobayashi and N.Otsu, ”Action and Simultaneous Multiple Persons Identification Using Cubic Higherorder Local Auto-Correlation”, Proc.ICPR, 2004.
- [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.

表1 実験結果

		判定結果	
		OK作業	NG作業
入力	OK作業データ	80	76
	NG作業データ	12	0