

# 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 —

曾賀野 健一      渡辺 博己      松原 早苗      棚橋 英樹

### Research of Failsafe Camera System using Motion Analysis

#### - Application to Packing Work -

Kenichi SOGANO    Hiroki WATANABE    Sanae MATSUBARA    Hideki TANAHASHI

**あらまし** 組立等の生産現場において、人的要因に基づく作業ミス（ヒューマンエラー）は、避けることのできない大きな問題である。作業ミスが起因となり、品質を満たさない不良品が流出した場合には、企業の信頼失墜や損失を招くだけでなく、人の生命に関わる重大な事故につながる危険性もある。製品等の品質や安心・安全を語る上で、作業ミスを未然に防ぐための対策（「ポカよけ」対策）は、企業にとって非常に重要度の高い課題であり、現場では様々な取り組みが行われているが、さらなる向上が望まれている。本研究では、カメラで取得した映像から作業者の動作をリアルタイムに解析し、人の作業を評価する新しい手法の研究開発に取り組んできた。これまでに、予め登録した作業手順ごおりの作業映像とリアルタイムに取り込まれる作業映像を比較する画像処理技術を開発し、作業ミスの検出手法に関する研究を実施した。今年度は、この手法を実際の作業現場における梱包作業に適用し検証実験を行った。その結果、本手法は作業者の動作の過程を簡単な装置を用いて解析し、かつ他のセンサや画像処理を併用することで、実際の現場で発生する作業ミスを早期かつ高い信頼性で検出可能であることを確認した。さらに、作業手順の途中に変則的な動作が存在する場合においても、評価の対象とする動作区間を設定することで作業の評価が可能であることを示した。

**キーワード** ポカよけ、映像、動作解析、作業評価、リアルタイム、異常検知

## 1. はじめに

大量生産が盛んな時代には、製品の欠陥を排除し、製品の品質や生産性を向上するために、機械設備の導入や製造技術・機械の高度化が進められていた。しかしその後は、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が進行しており、こうした需要の変化に対応した作業環境を早急に確保するために、(柔軟性の高い)人の介入が求められる状況となってきた<sup>[1]</sup>。

そのため、いまだに組立等の生産現場では、人的要因に基づく作業ミス（ヒューマンエラー）は避けることのできない大きな問題となっている。ひとたび、品質を満たさない不良品が市場へ流出した場合には、消費者に多大な迷惑をかけるばかりか、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。たとえ最終検査で市場流出を防ぐことができたとしても、工場内で不具合が発生した場合、ラインの停止、後戻り工数の増加、回収や廃棄等の大きな損失を被ることになる。また、人の生命に関わる重大な事故につながる恐れもある。平成22年1月に起きた東海道新幹線架線切断事故は、作業員のボルトの締め忘れが原因であり、結果として、約15万人の足

に影響が出た。部品が車両や乗客を直撃していた恐れもあり、現場の安全対策が問われる事態となった。

人が作業を行う以上、「長時間作業による注意力の低下」や「単純作業による慣れや油断」等が「作業忘れ」や「作業間違い」等の人的要因に基づく作業ミスを引き起こし、不良の発生につながることになる。製品等の品質や安心・安全を語る上で、作業ミスの発生状況や原因等を十分観察し、作業ミスを未然に防ぐための対策は非常に重要度が高い。

以上のような社会的背景をふまえて、本研究では、岐阜県の基幹産業である製造業を対象として、人的要因に基づく作業ミスを検出する「ポカよけ」手法の研究開発に取り組んできた。本手法は、作業中における作業者の動作の過程を簡単な装置を用いて解析し、リアルタイムに評価を行うことで、作業ミスを早期かつ高い信頼性で検出する点を特徴としている。

これまでに、予め登録した作業手順ごおりの作業映像と、リアルタイムに取り込まれる作業映像を比較する画像処理技術を開発し、作業ミスの検出手法に関する研究を実施した<sup>[3,4]</sup>。今年度は、この手法を実際の生産現場における梱包作業に適用し、実験により、その有効性を

検証した。

## 2. 作業ミス検出手法の概要

### 2.1 従来の作業ミス検出に対する取り組み

組立等の生産現場において人的要因に基づく作業ミスを検出することは重要度が高く、様々な取り組みがなされている。例えば、あるメーカーでは作業指示ランプや動作確認センサ等の機材を用いた作業ミス検知システムを導入している。こうした取り組みは、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、工具で締める際のトルク情報や部品数の員数管理等）から作業ミスを工程内で検出する方法の大きく2つに分けられる。

前者の方法では、検査工程が増加する程、工数増となるため、多用すると生産性が低下してしまう。そのため一般的には、一連の作業工程の中間や最終段階で検査工程が設けられることが多くなるが、検査回数が少なければそれだけ不良の発見が遅れることになり、後戻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、後者の方法では、工数を増加する必要がなく、作業工程内で作業ミスを検出することが可能となる。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、図1に示すように、部品箱に手を入れたことを検出する光電スイッチを用いた動作確認センサや、作業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用いられる。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たりすることにより、部品の取り付け忘れが発生する場合があります。作業ミスを検出できないことがある。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、ポイント型動作確認センサの情報のみでは作業全体の品質を十分に保証できないため、新たな作業ミスの検出手法が必要となる。

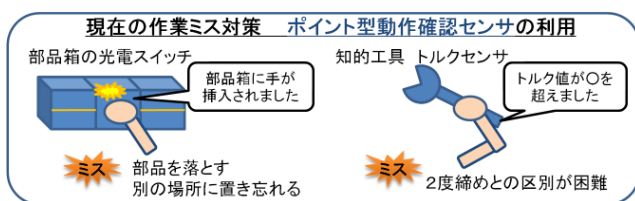


図1 現在の人的要因に基づく作業ミスに対する取り組み

### 2.2 新たな作業ミス検出手法の概要

本研究では、組立等の生産現場において既に使用されている前述のセンサ情報に加え、カメラ映像を用いて作業

の動作を解析し、リアルタイムに評価を行うことで、作業ミスを早期かつ高い信頼性で検出する手法を提案する。生産現場では、作業者が変わっても作業の品質を保つため、作業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。このように作業手順が定められていることを利用して、作業手順どおりの作業者の動作情報と実際の作業者の動作情報を比較することで作業ミスを検出する。まず、作業映像を構成する各フレームから動作の大きさと方向分布を表す動作特徴量を抽出し、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、この動作区間の動作の方向分布を表す動作特徴量を求める。そして、図2に示すように、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を獲得する。作業ミスは、予め登録した作業手順どおりの動作シーケンスとリアルタイムに獲得される実際の作業者の動作シーケンスを比較することで検出される。

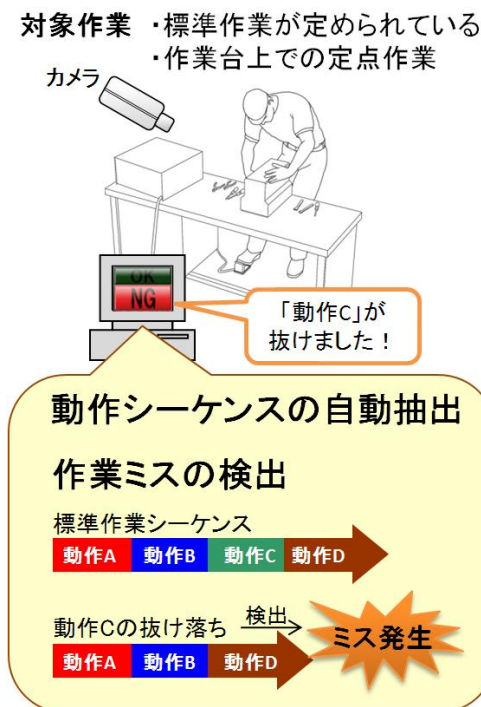


図2 新たな作業ミス検出手法のイメージ

なお、人の動作情報を取得する手法としては、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ため作業者が拘束され、また、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、標準作業が定められている作業台上での定点作業を対象として、作業者への拘束を必要とせず、現状の作業環境に簡便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。

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する。

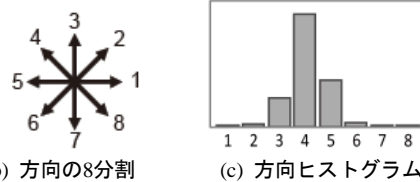
### 3. 作業ミス検出手法のしくみ

#### 3.1 動作特徴量の抽出

本手法では、従来の顔や手等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<sup>[2]</sup>をとる。具体的には、局所的な動作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る。方向ヒストグラムは、まず、図3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。本研究では、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3(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3(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3(c)）が生成される。



(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3 方向ヒストグラムの例

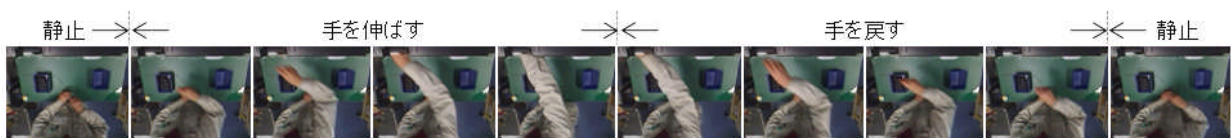
変化を示す。大きさの総和は、動作の開始とともに動きが大きくなり、動作の切り替わり時点で小さくなることからわかる。そのため、ここでは、全ベクトルの大きさの総和が減少から増加する時点をもとに分割点として検出する。

#### 3.2 動作単位の分割

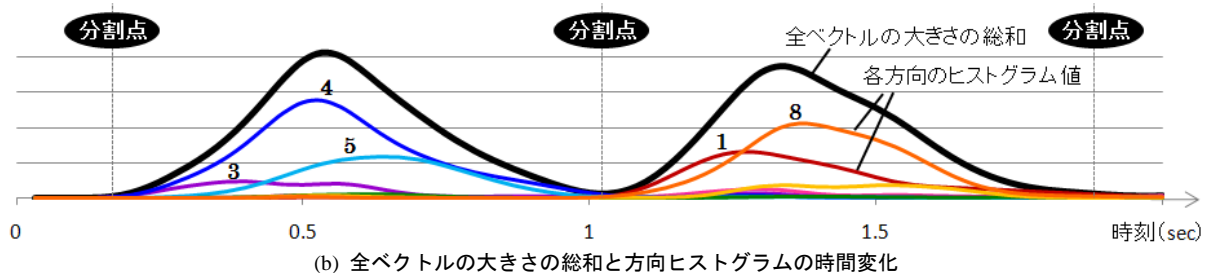
作業映像における動作単位と動作単位の切り替わりの点を分割点として検出することで、作業映像を動作単位に分割する。本手法では、作業における動作単位を始点と終点を結ぶ無駄のない動きと仮定することで、対象とする手の動作は、必ず「静止状態から速度を上げ、ある地点で速度が減少し静止する」という過程をもつことを利用する。そこで、図4(a)に「静止」→「手を伸ばす」→「手を戻す」→「静止」という映像の例を示す。また図4(b)に、この映像から抽出した全ベクトルの大きさの総和（太線）の時間

#### 3.3 動作特徴量の抽出

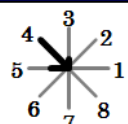
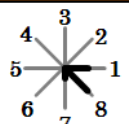
2つの分割点間を1つの動作単位を構成する動作区間とし、この動作区間の動作特徴量は、区間を構成する各フレームの動作特徴量（方向ヒストグラム）から求める。動作特徴量は、動作区間内の各フレームの方向ヒストグラムを方向ごとに積算し、全ベクトルの大きさの和で割ることで算出する。図4(c)に、図4(b)の分割結果と動き特徴量の時系列データから算出される動作特徴量とその最大となる方向の番号を記号として示す。全ベクトルの大きさの総和が小さく、動きがないと判定された区間は記号0とした。



(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

0	4	8	← 最大方向番号
			← 動作特徴量 (方向ヒストグラム)

(c) 動作シーケンス（動作特徴量）

図4 映像の分割と動作シーケンスの獲得

### 3. 4 作業ミスの検出

予め作業手順どおりの動作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た作業者の動作シーケンスを比較することにより作業ミスを検出する。

動作シーケンス $\mathbf{A}$ 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 $\mathbf{A}_i=(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i8})$ 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 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 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 $\mathbf{A}_i=(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i8})$ と $\mathbf{B}_i=(b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{i8})$ 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、閾値以下の場合に動作が異なると判定し、作業ミスとして検出する。

## 4. 実験

本手法の有効性を検証するため、実際の生産現場における梱包作業に適用し、実験により評価を行った。

### 4. 1 梱包作業において発生する作業ミスと提案手法

評価の対象とした作業は、製品（2段）と製品を間に挟んで中敷き（3段）を段ボールに入れる作業である。以下、作業の流れと発生する作業ミスについて述べる。

まず、作業の流れは、「段ボールを机に置く」→「中敷き（1段目）を入れる」→「製品（1段目）を入れる」→「中敷き（2段目）」→「製品（2段目）を入れる」→「中敷き（3段目）を入れる」→「段ボールのふたを閉める」という流れである。

複数の中敷きを入れる作業であるため、作業の途中で中敷きを入れ忘れる作業ミスが発生することがある。この作業は、段ボールに中敷きと製品を順に重ねて入れる作業であるため、中敷き（1段目、2段目）の有無を作業後に確認することができない。現場の作業ミス対策としては、光電センサを設置し、中敷きを段ボールに入れる前にセンサを通過させることで中敷きの数を管理する方法がとられている。この作業では3段の中敷きを入れることから、作業終了時に中敷きのセンサ通過回数が3回未満のとき、中敷きの「入れ忘れ」が発生したとして検出している。しかしこの方法では、中敷きをセンサ通過後に落としたり、どこかに置き忘れたりした後、次の作業へ移った場合、中敷きの「入れ忘れ」の作業ミスを検出できないといった問題が現場で発生した。

本研究では、「センサを通過させた」等のポイント型動作確認センサでは作業ミスの発生を十分に防止できない現状の問題に対して、「センサ通過地点から段ボールまで中敷きを運ぶ」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作業ミス検出を行う。また、本実験では、動作を評価した後に、段ボール内の中敷きの有無を輝度

より判定することで、さらに信頼性を高める処理を加える。

### 4. 2 実験条件

作業環境は、図5(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台と作業ミス検出の処理を行う1台のPCとした。カメラで取得された画像例を図5(b)に示す。1つの作業データは、1段目の中敷きを通過センサに通した時点から、3段目の中敷きを入れ終える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。

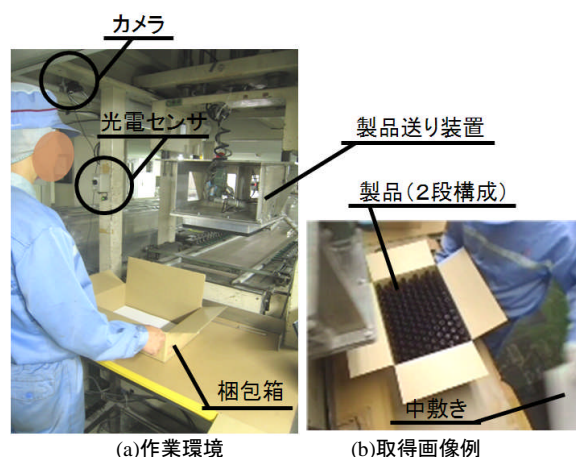


図5 作業環境と取得画像例

実験では、作業手順どおりの作業（以降、OK作業と呼ぶ）のデータ316件、作業手順と異なった作業（以降、NG作業と呼ぶ）のデータ4件の合計320件を用い、評価を行った。これらのデータは、作業者の変更による個人差の影響を確認するため、作業者2名がそれぞれOK作業を165件と151件、NG作業を各2件行ったデータである。

NG作業データは、以下の2種類のシナリオとした。NGシナリオ2は、従来の通過センサのみを用いた作業ミス対策では検出できず問題となっていた状況を再現した。

#### <NGシナリオ1>

「中敷き（3段目）」を入れる動作を忘れる。

#### <NGシナリオ2>

「中敷き（1段目）」をセンサ通過後、人に話しかけられて中敷き（1段目）を別の場所に置き忘れ、次の作業へ移り、中敷き（1段目）を入れ忘れる。

### 4. 3 作業データの解説

作業の動作に関して評価を行うにあたり、作業手順どおりの動作であれば、これまでに開発した評価手法により評価が可能である。ところが実際の作業現場では、「中敷き（1段目）を入れる」から「製品（1段目）を入れる」に移る間に、段ボールの位置調整等の変則的な動作が入ることがあるため、新たな工夫が必要となった。

本研究では、「中敷きの入れ忘れ」を未然に防止することが重要であることから、中敷きが光電センサを通過した

後の「中敷きを入れる」動作区間を評価の対象とした。動作区間の始点は中敷きが光電センサを通過した時点とし、終点は中敷きを段ボールに入れる動作が終了した時点とした。

図6に、標準作業データの動作シーケンスの例を示す。映像により動作が、「中敷き（1段目）を入れる」、「中敷き（2段目）を入れる」、「中敷き（3段目）を入れる」の動作区間に分割される。

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6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のみを示す。

一方、「中敷きを入れる」動作が正しいと判定されたが中敷きが挿入されていない作業ミス（例えば、話しかけられることにより中敷きが段ボール上を通過等）が発生する可能性が考えられるため、「中敷きを入れる」動作の前後において段ボール内に輝度の差が検出された場合に中敷きが段ボール内に存在すると判定する方法も併用した。なお、段ボール内の輝度検出のみでは段ボールが明るく反射して、中敷きと誤判定される場合があること等から十分な

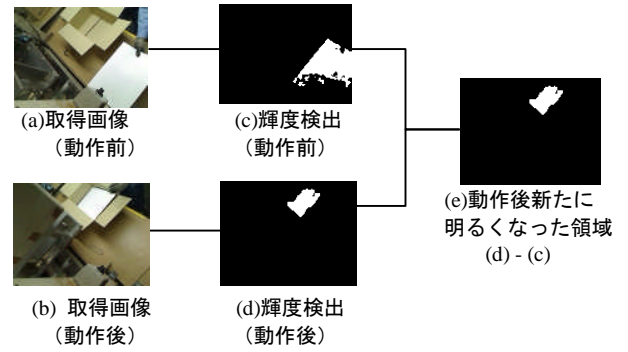


図7「中敷き（1段目）を入れる」動作前後での輝度検出の例

判定ができない。そのため、「中敷きを入れる」動作の判定を行った後に輝度の判定を加えることにより作業の評価を行った。いずれの判定も正しい場合のみ、正しい作業であると判定される。

図6の「中敷き（1段目）を入れる」動作の前後における輝度検出の例を図7に示す。動作の前後で取得された画像は(a), (b)であり、それぞれ輝度検出を行った画像が(c), (d)である。(c)と(d)の画像を比較して、動作後に新たに明るく変化した領域を検出した結果が(e)である。

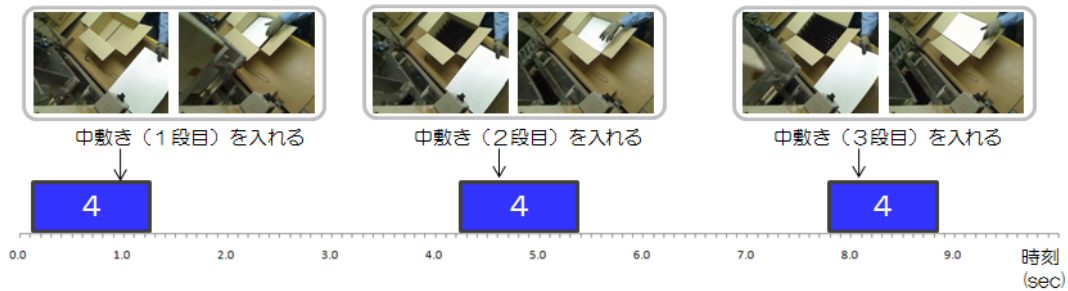


図6 標準作業データに対する動作シーケンス例

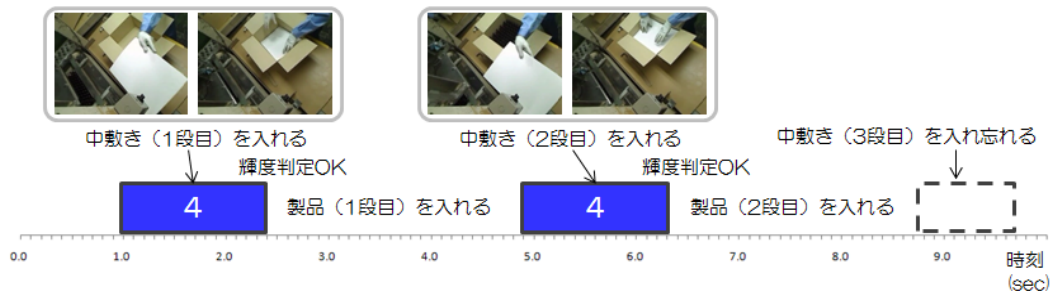


図8 NGシナリオ1の作業データに対する動作シーケンス例

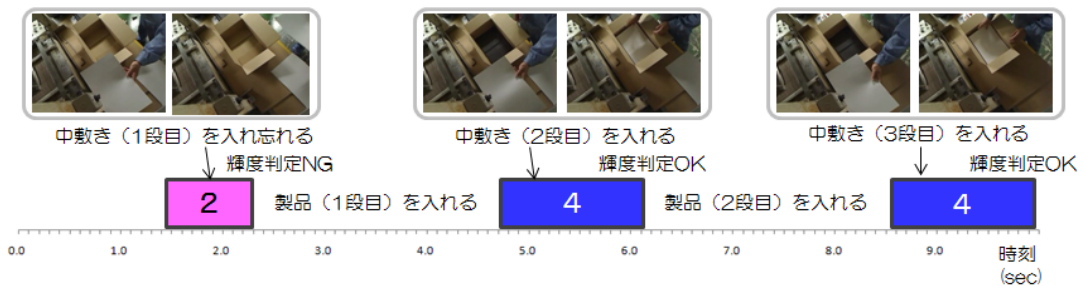


図9 NGシナリオ2の作業データに対する動作シーケンス例

図8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。「中敷き（1段目）を入れる」→（輝度判定）→「中敷き（2段目）を入れる」→（輝度判定）となり、「中敷き（3段目）を入れる」→（輝度判定）が抜け、「中敷き（3段目）」の入れ忘れが発生したことがわかる。正しく中敷きを入れたと判定されたのは2回であり、本来の3回と異なるため作業ミスとして検出された。

図9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。「中敷き（1段目）センサ通過」→人に話しかけられる「中敷き（1段目）を持ち作業台を離れる」→（輝度判定）→「作業台に戻る」→「中敷き（2段目）を入れる」→（輝度判定）→「中敷き（3段目）を入れる」となり、「中敷き(1段目)を入れる」動作と「作業台を離れる」の動作が異なることがわかる。正しく中敷きを入れたと判定されたのは2回であり、本来の3回と異なるため作業ミスとして検出された。このNG作業は、従来の通過センサのみを用いた作業ミス対策では検出が不可能で問題となっていたが、動作の評価を加えることで作業ミスの検出が可能となったことがわかる。

#### 4. 4 作業ミス検出の精度評価

作業手順どおりの作業データを予め登録し、評価する作業データとの類似度を閾値により評価することで、作業ミス検出を行った。さらに、中敷きを入れる動作の類似度を評価した後に、段ボール内の輝度を評価することで、作業ミス検出の信頼性を高める処理を併用した。

ここでは、作業手順どおりの作業として登録した動作として、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、作業ミスの検出処理を行い、OK作業かNG作業かを判定し、作業ミスの未検出率、過検出率を評価した。評価結果を表1に示す。なお、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。また、動作の類似度を評価する際の閾値は、実験的に0.8とした。

表1 実験結果

			判定結果	
			OK作業	NG作業
入力	OK作業データ	316	304	12
	NG作業データ	4	0	4

OK作業データ316件に対して、304件がOK作業と正しく判定され、正解率は96.2%であった。2名の作業員別の正解率は、それぞれ95.7%、96.6%であり、作業員の個人差による影響は見られなかった。このことは、作業員の変更等により、各動作に要する時間が異なった場合においても、類似度の評価において高い正解率を得られたことで、本手法は、作業員の変更や動作時間のばらつきに対して、ロバスト性を有していることを示している。

一方、OK作業データがNG作業と過検出された原因は、作業手順の誤り等の中敷きの動作が異なることによるも

のであり、標準作業として予め登録した動作と異なるため、NG作業として判定されたものである。過検出の事例は、作業ミスにつながる危険性を有していることから、作業手順の見直しや中敷きが通過しやすい位置にセンサを移す等、作業改善に向けた情報としての活用も考えられる。

NG作業データ4件に関しては、NG作業と正しく判定され、未検出率は0%であった。評価の際に、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は0%であることが重要である。

## 5. まとめ

組立等の生産現場における人の作業品質の向上を目的として、映像の動作解析を行うことで人が行う作業を評価し、作業ミスを検出する手法を提案した。

本手法の有効性を検証するため、実際の生産現場である梱包作業に適用し、実験により評価を行った。その結果、本手法は、作業中における作業員の動きの過程を簡単な装置を用いて解析し、リアルタイムに複数の評価を併用することで、実際の生産現場で発生する作業ミスを早期かつ高い信頼性で検出することが可能となった。すなわち、従来の光電センサを用いた中敷きの員数管理に加えて、作業員が中敷きを運ぶ動きの評価と、中敷きが段ボールに入ったことを示す輝度の評価を併用することで、作業ミス検出の向上が図られた。さらに、作業手順の途中に変則的な動作が存在する場合においても、評価の対象とする動作区間を設定することで作業の評価が可能であることを示した。また、作業員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。

## 謝 辞

本システムへの助言や現場提供等、御支援・御協力を頂きました皆様に感謝致します。

## 文 献

- [1] 平野裕之，“品質保証と自動化”，日刊工業新聞社，2001.
- [2] T.Kobayashi and N.Otsu, "Action and Simultaneous Multiple Persons Identification Using Cubic Higherorder Local Auto-Correlation", Proc.ICPR, 2004.
- [3] 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.
- [4] 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.