

カメラ映像を用いた作業解析技術の研究と作業ミス検出への応用

清水 早苗 平湯 秀和 浅井 博次

Research of Motion Analysis using Camera and Application for Human error Detection

Sanae SHIMIZU Hidekazu HIRAYU Hirotsugu ASAI

あらまし 製造分野の組立作業工程において、ヒューマンエラーの検出は製品の品質・生産性向上のために重要な課題である。本研究では、組立作業を行う作業者の動作に着目し映像を用いて作業を解析する手法を提案し、作業の正否判定を行うことで、作業ミスを検出する。具体的には、動作特徴量として局所的動きベクトルの統計量を用い、その時系列データの変化から動作単位に映像を分割し、動作の分類を行う。これにより得られる動作の種類と順序の情報である動作列データと、標準化された動作列データと比較することで、作業の正否を判定する。また、実際の組立作業に対して実験を行い、本手法の有効性について検討を行った。

キーワード Industrial Engineering, 動作分析, 作業分析, 異常検知, 映像分割

1. はじめに

製造現場において自動化により品質と生産効率の均一化が進められてきた。しかし、特に組立工程においては、いまだ自動化の難しい複雑・繊細な作業工程が存在することや、近年急増している多品種少量生産に対応するための十分な設備投資が難しいことから、人の介入が必要な工程が多く存在する。人が介する作業においては、「作業間違い」や「作業忘れ」といったヒューマンエラーによる品質不具合が発生する。この不良品が市場へ流出した場合、利用者からの信頼を失うことはもちろん、例え、検査で市場流出を防ぐことができたとしても、ライン停止、後戻り工数の発生や廃棄等の大きな損害が生じるなど多大な影響を及ぼす。そのため、製造現場においてヒューマンエラー防止策は最大の課題とされている^[1]。

従来、作業ミスを検出するための方法として、部品の機能検査があるが、部品が完成するまでミスの発見が難しいという問題がある。また、取り付け部品の有無を確認する外観検査があるが、作業の正否までは評価できないため、工具や治具の器具信号の計数により作業の有無や正否を評価する方法が取られている。しかし、この器具信号による計数は実作業と整合が取れない場合があり、信頼性に課題がある。

そこで、本研究では、作業者の動作に着目し映像を用いて作業を解析する手法を研究開発することで、作業の正否判定を可能とする手法を提案する。本手法では、まず、組立作業における定型作業を対象として、定められた部品に「手を伸ばす」、「手を戻す」等の動作単位に映像を分割し、その動作の種類とその順序の情報である動作列データを獲得する。この動作列データから作業の分

類や作業の評価を行う。本研究において用いる動作特徴は、従来の画像中から顔や手などの注目する点や領域を用いる手法^[2,3]に対して、作業現場のような複雑な環境に対してもロバストな局所的動きベクトルの統計量を用いる。

本稿では、具体的な作業として、自動車部品の組立工程において最も重要かつ基本的な作業のひとつであるネジの締め付け作業を対象とし、「締め付け忘れ」の作業ミスを検出する方法について述べる。さらに、映像に加え、工具の器具信号を併用することで、信頼性を向上させる方法についても述べる。また、実際の自動車部品の組立工場にて撮影したネジの締め付け作業の映像に対する実験により、本提案手法の有効性を示す。

2. 作業解析手法の概要

本研究では、作業映像を2つの層（作業層、動作層）に分けて作業の解析を行う。映像は、複数の連続するフレームから構成されるが、ここで、作業層は、「ひとつのネジを締め付ける」等、個々の作業を意味する区間に分割する層、動作層は「ネジに手を伸ばす」、「トルクレンチをまわす」等の意味ある最小単位の動作に分割する層である。作業映像と作業の階層構造の対応関係を図1に示す。

次に、映像から動き情報を用いて動作列データを獲得する処理手順について述べる。まず、映像の各フレームに対して作業者の動きを表す動作特徴量を抽出する。次に、この動作特徴量の時系列データの変化から動作単位に映像分割し、動作列データを獲得する（図1:動作層）。作業は、複数の動作の集合であり、動作の種類とその順

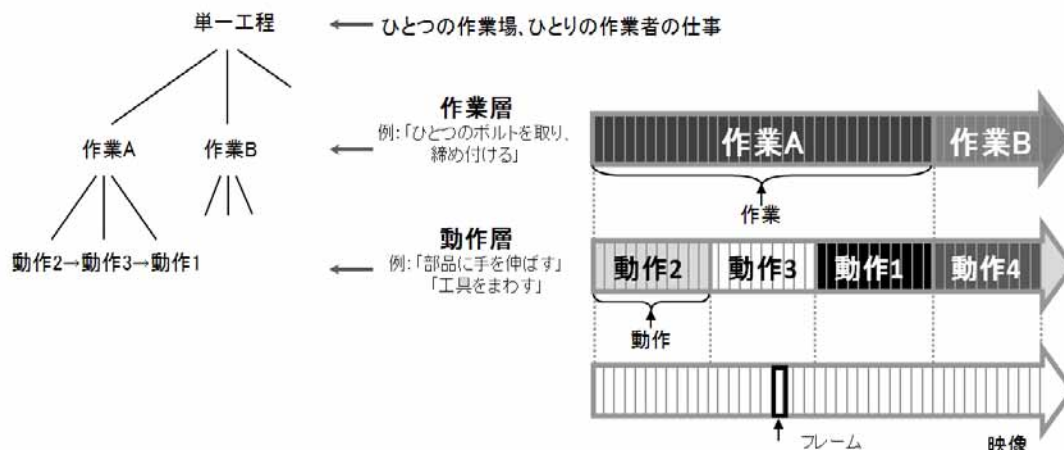


図1 作業と映像の階層構造の対応関係

序の情報である動作列データで表現されることから、あらかじめ作業ごとに定められた動作列データと獲得された動作列データの類似性を評価し、作業を分類、検出する。図1は、動作2→動作3→動作1の動作列データが作業Aに対応し、分類した例である。

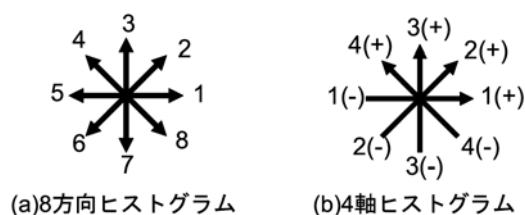


図2 動き方向ヒストグラム

3. ネジ締め作業の解析

ネジの締め付け作業は、最初に部品を治具に固定し、複数のネジを対応する箇所到手締めする。次に、規定トルクに達するまでトルクレンチを「締める方向に回転させる」→「戻す」の動作を繰り返す締め付け作業を行う。ここで、締め付ける箇所は複数であるため、途中、締め付け作業を忘れるミスが発生することがある。現在、現場では、トルクレンチが規定トルクに達した時に発するロック信号をカウントし、その数が締め付けるべきネジ数より小さい場合、「締め付け忘れ」が発生したと検出している。しかし、このシステムでは、同一箇所、同一ネジに対して2度締めした場合、2つのネジを締め付けたと判断され、それ以降にネジを一つ締め付け忘れてもロック信号数とネジ数は一致し、「締め付け忘れ」を検出できない問題がある。これは、ロック信号では、2度締めと通常の締め付け作業とを区別できないためである。

これに対し、本研究で提案する作業者の動作に着目した手法の場合、正しい締め付け作業は、規定トルクに達するまでに「締める」→「戻す」の動作が繰り返されるのに対し、2度締めは一度締め付けがなされているため、動作を繰り返さないという違いから、この2つの作業を区別することが可能である。そこで、「締める」→「戻す」の動作が繰り返される締め付け作業のみを正しいと判定し、検出することで、信頼性の高い「締め付け忘れ」検出を行う。

本章では、まず、「締める」や「戻す」等の動作単位に映像を分割する手法、そして分割された動作の並びから正しい締め付け作業を検出する手法について述べる。

3.1 動作単位の映像分割

映像を動作単位に分割するために、動作と動作の切り替わりの点であるカット点を検出する。

従来、複数の映像が編集によりつなぎ合わされた映像のカット点を検出することを目的として、輝度や色などの画像情報の隣接フレーム間の差分を特徴として用いる手法^[4,5]があるが、環境が薄暗い場合や背景が似ている場合などで、カット点を見逃す問題があった。また、動きベクトルの大きさを利用する手法は、映像中の物体の大きな動きをカット点として誤検出してしまう問題がある。この問題を解決することを目的として、映像の切り替わりと映像中の大きな動きを区別するため、動きベクトルの方向分布の変化に着目し、特徴として動き方向ヒストグラムを用い、隣接フレーム間の方向別ヒストグラムの絶対差分和によりカット点を検出する手法^[6]が提案されている。

本研究では、作業における動作は始点と終点とを結ぶ無駄のない動きであるという条件を満たすものとする。そうすることで、ひとつの動作中は動きの方向が変化しないが、動作の切り替わりでは動き方向が変化することに注目し、動きベクトルの方向ヒストグラムの変化から動作のカット点を検出する。動き方向ヒストグラムを求める処理として、まず、時刻 t での映像中の複数の点に対して算出した個々の動きベクトルを、その方向の最も近い分割方向へ分類する。図2(a)に示すように方向分割数を8とした場合、 $i(i = 0, \dots, 7)$ 番目の方向 d_i に属する動きベクトルの大きさの和をそれぞれ算出することで、動き

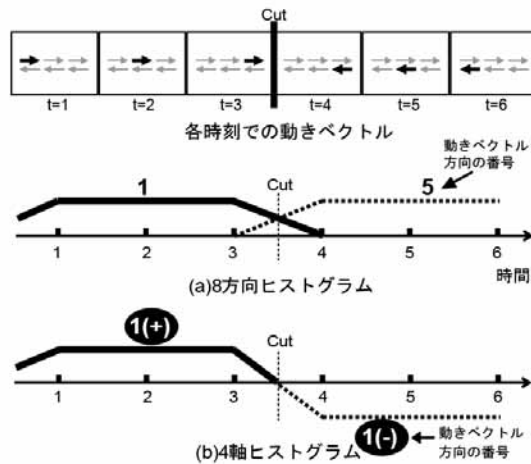


図3 動き方向ヒストグラムの変化からのカット点検出
(単一方向の動作の場合)

方向ヒストグラム $h_8(d_i, t)$ を求める. この動きヒストグラムの隣接フレーム間の絶対値差分和は式(1)で表される.

$$SAD_8(t) = \sum_{i=0}^7 |h_8(d_i, t) - h_8(d_i, t-1)| \quad (1)$$

この動き方向ヒストグラムの絶対値差分和を評価値として用いた場合, 図3に示すように, ひとつの動作中に方向変化がない動作においては動作単位に分割できることがわかる (図3(a)). 一方, 図4に示すようにひとつの動作中であっても, 徐々に隣接方向ベクトルへ移行する場合, このような隣接方向への変化に対してもカット点として検出される (図4(a)). そのため, 「ねじ締め」作業のような隣接方向への変化はひとつの動作とする場合は, 分割された区間を統合する処理を行うか, 隣接方向への変化はカット点として検出しない評価値を用いる必要がある. ここでは, 動き方向ベクトルの方向変化でも, 隣接方向への変化と反転する方向への変化を区別し, 反転変化のみをカット点として検出する方法について述べる.

図2(b)に示すように, 8方向のヒストグラムを正負の符号をもつ4軸のヒストグラム $H_4(d_i, t) (i = 0, \dots, 3)$ に式(2)により変換した特徴を用いる.

$$H_4(d_i, t) = h_8(d_i, t) - h_8(d_i + 4, t) \quad (2)$$

動作が切り替わる点では, 図3(b)や図4(b)に示すように各軸のヒストグラム値の符号が反転する. 同時に4軸の値が0に近づくことから, 4軸のヒストグラム値の絶対値和を評価値とし, 極小をとる点をカット点として検出する. 4軸のヒストグラム値の絶対値和を式(3)に示す.

$$SAD_4(t) = \sum_{i=0}^3 |H_4(d_i, t) - H_4(d_i, t-1)| \quad (3)$$

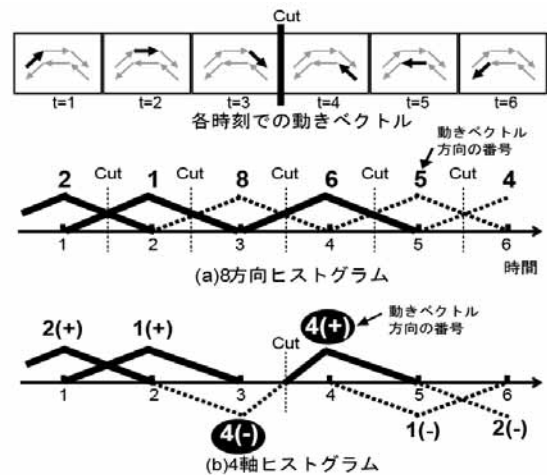


図4 動き方向ヒストグラムの変化からのカット点検出
(隣接方向への方向変化を含む動作の場合)

3.2 ネジ締め作業の検出

ネジの締め付け作業は, 「締める」→「戻す」という一連の動作を繰り返す作業である. そこで, この一連の動作の連続回数が閾値以上の場合, その連続区間を締め付け作業として検出する. ここで, 一連の動作が連続か否かの判定は, 2つの動作区間の動作特徴量の2乗差分和を類似度とし, その類似度に対する閾値処理により行う. 動作区間の動作特徴量はその動作を構成する全フレームの動作特徴量を積算し, 正規化したものとする.

締め付け作業は, ひとつのネジ毎に検出される必要がある. 締め付け作業の開始は, 同一動作の連続回数が閾値以上となった場合, そのカウントが始まった時刻とする. 締め付け作業の終了は, 以下の3つの条件のうち少なくとも1つを満たす場合とする.

(1) 動作特徴の類似性

同一ネジを締め付ける動作は, ネジを締め付ける回転軸が一致しているため, 「締める」動作同士, 「戻す」動作同士はほぼ同一の動作特徴量をもつ. そこで, 現動作とその2つ前の動作に対して前述の類似度を算出し, 閾値以下の場合, 他の動作に移ったとして終了とする.

(2) 動作の大きさ

通常, 締め付け作業間には, 次のネジに移り, トルクレンチをネジにセットする動作が入る. トルクレンチをセットする動作は, 微調整であり動きが小さいため, 動きベクトルの大きさに対して閾値処理をすることで検出し, 終了とする.

(3) 動作時間長の変化

締め付け始めは負荷が小さく, 「締める」動作の時間が短い, 締め付けを繰り返すに従い, 負荷が大きくなるため動作区間の時間が長くなることに着目し, 隣接する動作区間の時間が小さく変化する場合を終了とする.

また, 締め付け作業は, トルクレンチが規定トルクに達することにより終了する. このとき出力されるロック信号を併用して評価することでさらに信頼性を向上でき



図5 取得画像例

と考えられる。このことについて、次章にて述べる。

4. 実験

実際の組立工場におけるネジ締め作業の映像に対して、締め付け作業の検出を行った実験結果を示す。

4. 1 実験の設定

締め付けネジ数10本のA部品、ネジ数4本のB部品の2種類の組立作業に対して、それぞれ、10個、4個、つまり計116の締め付け作業の映像を用い、本手法の有効性を検証した。映像データは、フレームレートは30fps、サイズは160pixel×120pixelのグレースケール画像である。カメラは作業者から見て右上方の位置に固定した。取得された画像例を図5に示す。

4. 2 ネジ締め付け作業の検出結果

2度締めと区別し、「締める」→「戻す」を繰り返す正しいネジの締め付け作業のみをカウントすることで「締め付け作業忘れ」を検出することが目的である。そこで、ここでは、式(4)に示すように、検出すべき作業数（＝ネジ数）に対して、提案手法により検出された正解作業数の割合を評価する。検出された正解締め付け作業数は、作業の開始から終了まで正しく検出されているか否かを目視により判定し、カウントした。

$$\text{正解検出率} = \frac{\text{検出された正解作業数}}{\text{検出されるべき作業数}} \quad (4)$$

締め付け作業として検出する同一動作の連続回数の閾値は3回、また、同一動作を判定する類似度の閾値は0.2とした。

検出すべき締め付け作業数は116、提案手法により検出された正解締め付け作業数は113であり、正解検出率は97.4%であった。高い確率で締め付け作業が検出できることがわかる。そして、トルクレンチのロック信号では区別が困難であった2度締めの映像に対してもネジ締め作業の検出処理を行った。2度締め作業数116に対して、正しいネジ締め作業と判断された作業数は0であり、誤検出されなかったことを確認した。

正しく検出ができなかった3つのネジの締め付け作業の状況は、締め付け作業中にトルクレンチがすべり、繰り返し動作が途切れた場合であった。作業が途切れた場合、ひとつのネジに対して2回締め付け作業を行うこととなるため、正確な作業数をカウントできない。そこで、

映像による動作の連続性と、作業の終了を正確に得られるトルクレンチのロック信号を併用することとした。ロック信号間はひとつのネジに対する締め付け作業と判断できる。同一動作の連続回数がすべりにより途切れた場合でも、ロック信号間はリセットすることなくカウントし、その数が3回以上の場合、ひとつのネジに対して正しく締め付け作業が行われたと判定し、検出する。同一の作業映像に対して、この処理を行った結果、検出すべき締め付け作業数116に対して、検出された正解締め付け作業数は116となり、正解検出率は100%であった。この結果から、映像による動作評価とトルクレンチのロック信号を併用することで、作業検出の信頼性が大きく向上したことがわかる。

5. まとめと今後の課題

製造業の組立工程における品質・生産効率の向上を目的として、カメラ映像を用い、作業者の動作列データを獲得することで、ヒューマンエラーを検出する手法を提案した。本稿では、ネジ締め作業を対象として、作業映像を動作単位に分割する手法、動作の繰り返しパターンから締め付け作業を検出する処理について述べた。また、映像による動作の連続性とトルクレンチのロック信号とを併用することでネジの締め付け作業に対する正否判定の信頼性を高めた。実際の組立工場における作業映像に対して評価実験を行い、有効性を示した。

今後は、実証実験により個人差の影響に対するロバスト性評価を行っていく。

文 献

- [1] “平成17年度自動車のリコール届出内容の分析結果について”，国土交通省自動車交通局，2006。
- [2] M. Brand, N. Oliver and A. Pentland, “Coupled hidden Markov models for complex action recognition”, Proc.CVPR, pp.949-999, 1997.
- [3] 三浦宏一，高野求，浜田玲子，井手一郎，坂井修一，田中英彦，“料理映像の構造解析による調理手順との対応付け”，信学論(D-II)，Vol.J86-DII，No.11，pp.1647-1656，2003。
- [4] J.S. Boreczky and L.A. Rowe, “Comparison of video shot boundary detection techniques”, Proc.SPIE, vol.2664, pp.170-179, 1996.
- [5] 中島康之，氏原清乃，米山暁夫，“部分複合を用いたMPEG データからのカット点検出”，信学論(DII)，Vol.J81-D-II，No.7，pp.1564-1575，1998。
- [6] 鈴木賢一郎，中嶋正臣，坂野鋭，三部靖夫，大塚作一，“動き方向ヒストグラム特徴を用いた映像データからのカット点検出法”，信学論(D-II)，Vol.J86-D-II，No.4，pp.468-478，2003。