

人物動作に着目したシーン分割による作業動作の異常検出

清水 早苗[†] 平湯 秀和[†] 浅井 博次[†] 丹羽 義典[†]

[†] 岐阜県情報技術研究所 〒509-0108 岐阜県各務原市須衛町4-179-19
E-mail: †{shimizu, hirayu, asai, niwa}@gifu-irtc.go.jp

あらまし 製造現場の作業においてヒューマンエラーを検出することは、製品の品質・生産性向上のために最も重要な課題とされている。本研究では、組立作業を行う作業者の映像に対して動作を解析することで、異常動作（作業ミス）を検出する手法を提案する。まず、映像から動作特徴量として動きベクトルの方向ヒストグラムを抽出し、その動作特徴量に基づき映像を作業シーンに分割・分類する。この処理により得られる作業パターンと標準化された作業パターンとを比較することで、作業ミスを検出する。また、実際の組立作業の映像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。

Anomaly detection using scene segmentation by worker's motion

Sanae SHIMIZU[†], Hidekazu HIRAYU[†], Hirotsugu ASAI[†], and Yoshinori NIWA[†]

[†] Gifu Prefectural Research Institute of Information Technology, 4-179-19 Sue-cho,
Kakamigahara City, Gifu, 509-0108 Japan
E-mail: †{shimizu, hirayu, asai, niwa}@gifu-irtc.go.jp

Abstract Human error detection is the most important to improve the quality of the products and the productive efficiency. In this paper, we propose a method for detecting mistakes of work operation using movies captured worker's motion. We first segment the movie and classify the scenes of work by extracting motion features, and then detect anomaly by comparing the work pattern with standardized work pattern. Experiments to the movie captured in the real manufacturing premise show the effectiveness of the proposed method.

1. はじめに

製造現場における組立工程では、機械化が進みつつあるが、細かく複雑な作業や多品種少量生産への対応などの理由から、人の介在が必要な工程が多く存在する。そのため、現場では「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、工場内で発生した場合、ライン停止、後戻り工数の発生や廃棄など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の防止策は最大の課題とされている [1]。

従来、大手メーカーでは、量産品を対象として作業指

示ランプや動作確認センサなど大量の機材を用いた作業ミスを発見するシステムを構築し、対策を行ってきた。しかし、近年要求の多い多品種少量生産の多様な組立作業への対応が課題となっている。また、作業ミスはその場で発見することで、次工程への流出を防ぎ、また後戻り工数や廃棄を最小化することも求められるが、作業工程ごとに検査を行うことは、工数増となり、生産性を低下させる問題もある。

そこで、従来の大量のセンサによる部品等のモノに注目した手法に対して、本研究では、作業者の動作に注目し、動作に対する異常動作（作業ミス）をカメラ映像から検出することで、多様な組立作業に柔軟で簡便に対応可能な手法を提案する。本手法では、組立作業のような定型作業の映像を作業者の動作特徴に基づき作業シーン

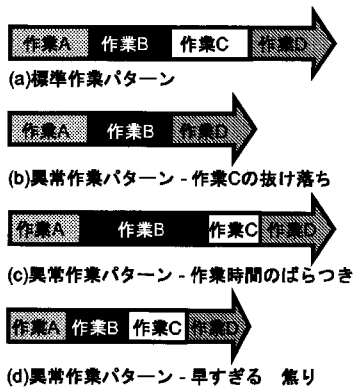


図1 作業パターンの例

に分割・分類することにより獲得される作業パターンと、標準化された作業パターンとを比較することで、作業の異常を検出する。

従来、画像から動作特徴を抽出する方法のひとつとして、画像中から顔や手などの注目する点や領域を抽出する方法があり、動作認識や映像のシーン分割に用いられている [2], [3]。しかし、人間の体は複雑であり、オクルージョンや大きな見えの変化が生じる可能性があるため、安定な特徴抽出が困難な場合がある。この問題に対処するため、本研究では、局所的動きベクトルの方向ヒストグラムを動作特徴として用いることで、オクルージョンに対してロバストな作業シーンの分割を行う。

本稿では、具体的な作業として、組立工程において最も重要かつ基本的な作業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手法について述べる。

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して実験を行い、本提案手法の有効性の検討を行った。

2. 作業の異常検出手法の概要

図1は作業パターンの例を示す。図1(a)に、作業Aから作業B、作業C、作業Dという順の標準作業パターンである。この標準作業パターンと比較し、図1(b)は作業Cが飛ばされ、作業忘れのミスが発生した場合の作業パターンの例である。また、本稿では検出していないが、作業時間も同時に取得できていることを利用して、作業時間のバラつきや作業スピードなど、作業時間を含めた作業の異常パターンについても検討できる。(図1(c),(d))

2.1 映像の構成と用語の定義

カメラ映像は多数のフレーム (frame) からできており、画像的に連続なフレームの集まりを、本稿ではショット (shot) と定義する。またショットとショットの境 (画像の

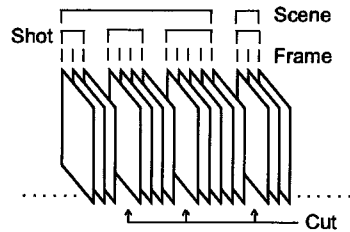


図2 映像の構造

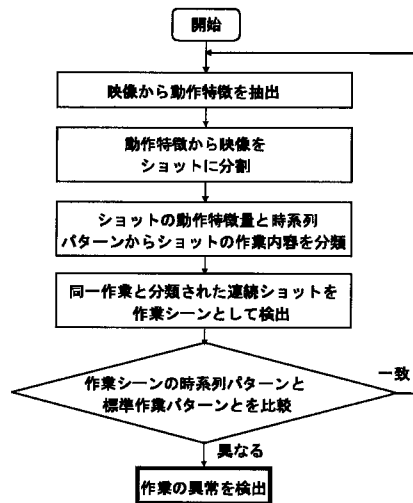


図3 提案手法の処理の流れ

変化点) をカット (cut), 更に複数のショットからひとつの意味のあるまとまりを構成するショットの集合をシーン (scene) と呼ぶ。この映像の構造を図2に示す。

2.2 作業動作の定義と処理の流れ

組立工程における作業動作は、定められた箇所に定められた部品を取り付ける無駄のない動作であるため、規則的な動作として扱うことができる。本稿では、作業動作を始点と終点を結ぶ無駄のない最適な動きと定義し、最小単位として扱う。この動作は前節のショットに対応する。そして、このショットの並びにより作業が表現され、シーンを構成する。

提案手法の処理の流れを図3に示す。まず、映像から抽出した動作特徴に基づき映像を動作単位のショットに分割する。次に、ショットの動作特徴量と時系列パターンからショットに対して作業内容の分類を行う。そして、同一作業として分類されたショットの集合を作業シーンとして検出する。

これらの処理により得られる作業シーンの時系列パターンと、標準作業パターンとを比較することで異常作業を検出する。

3. ネジ締め作業の作業ミス検出

本章では、具体的な作業として、組立工程において最も重要かつ基本的な作業であるネジの締め付け作業を対象とし、最も頻度の高い作業ミスである「締め付け忘れ」を検出する手法について述べる。

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レンチを「締める」→「戻す」の動作を繰り返す。レンチで締め付ける箇所は複数であり、締め付け作業を複数繰り返し行うため、途中、締め付け作業を忘れるミスが発生することがある。この作業漏れを検出するために、レンチにトルクセンサをつけ、締め付け作業の回数をカウントすることで、「締め付け忘れ」ミスを検出するシステムが現場では利用されている。このシステムは、トルクが閾値以上となった回数を締め付けたネジの個数として判断し、作業終了後カウントを表示することで、締め付けるべきネジの個数と一致していることを確認する。一致していない場合は、「締め付け忘れ」などの作業ミスがあったとして、作業の再確認を要求する。しかし、このシステムでは、同一箇所、同一ネジに対して2度締めした場合でも、2つのネジを締め付けたと判断され、それ以降のネジをひとつ締め付け忘れてもカウントは規定をクリアし、「締め付け忘れ」を検出できない問題がある。

通常1回目の締め付けでは、手で仮締めされているだけであるため、「締める」→「戻す」の動作が1, 2回で規定トルクに達することはない。一方、2回目の締め付けは、一度規定トルク以上の締め付けがすでに行われているため、「締める」→「戻す」の動作が繰り返されることはない。そこで、動作に注目した本提案手法により、2度締めにカウントすることなくネジの「締め付け忘れ」のミスを検出する。ネジ締め付け作業においては、レンチを奥から手前に引く「締める」動作と手前から奥に「戻す」動作が基本動作となり、ショットに分割される。

ネジの「締め付け忘れ」のミスを検出するため、動作単位にショットを分割する方法、そのショットの組み合わせからショットのネジ締め作業判定を行う方法、ネジ締め作業シーンを検出する方法について述べる。

3.1 ショット分割

作業映像に対して局所的な動きベクトルの統計量を用いることで動作単位のショットに分割する。つまり、ショットとショット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、カット点を見逃すという問題があった。

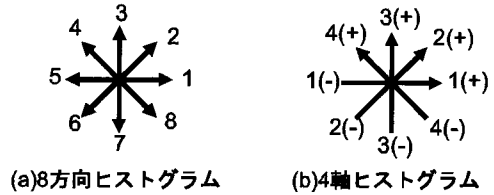


図4 動き方向ヒストグラム

また、動きベクトルの大きさを利用する手法には、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いう問題がある。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違いを表現した動き方向ヒストグラム特徴を用い、隣接フレーム間の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。

複数の映像がつなぎ合わされた映像に対してカット点を検出するこれらの手法に対し、本稿では作業者の動作に着目したカット点の検出を目的とした特徴を提案する。

本研究では、作業動作を始点と終点を結び無駄のない最適な動きとして扱う。そこで、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。方向分割数を図4(a)に示すように8とした場合、時刻 t における動きベクトルの方向ヒストグラムは $h_8(d_i, t) (i = 0, \dots, 7)$ 、その隣接フレーム間で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5に示すように、ひとつの動作中に方向変化がない動作には対応できる(図5(a))。しかし、図6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があるが、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図6(a)のような誤検出することがある。そこで、動き方向ベクトルの方向変化でも、隣接方向ベクトルへの変化と反転する方向ベクトルへの変化とを区別し、反転変化のみをカット点として検出する。

図4(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5(b)や図6(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。4軸の符

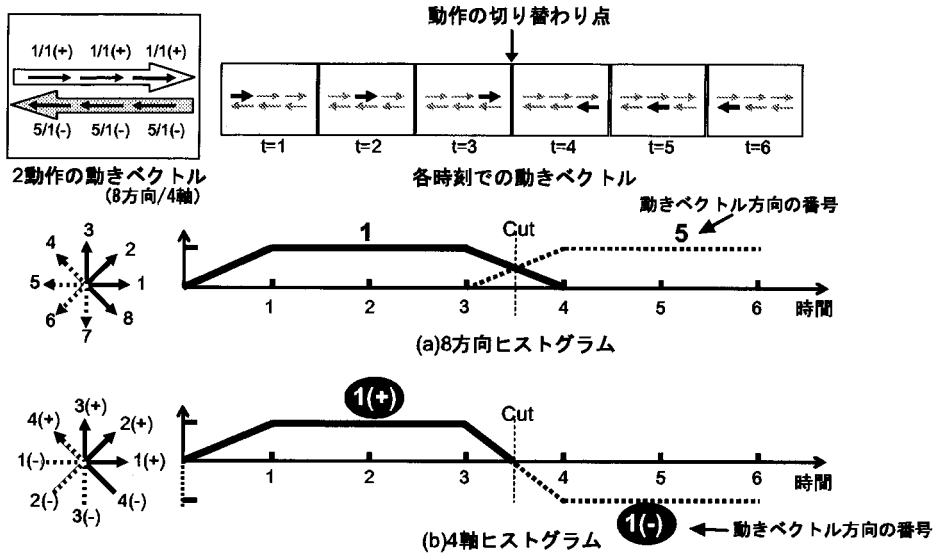


図5 動き方向ヒストグラムの変化量からのカット点検出（単一方向の動作の場合）

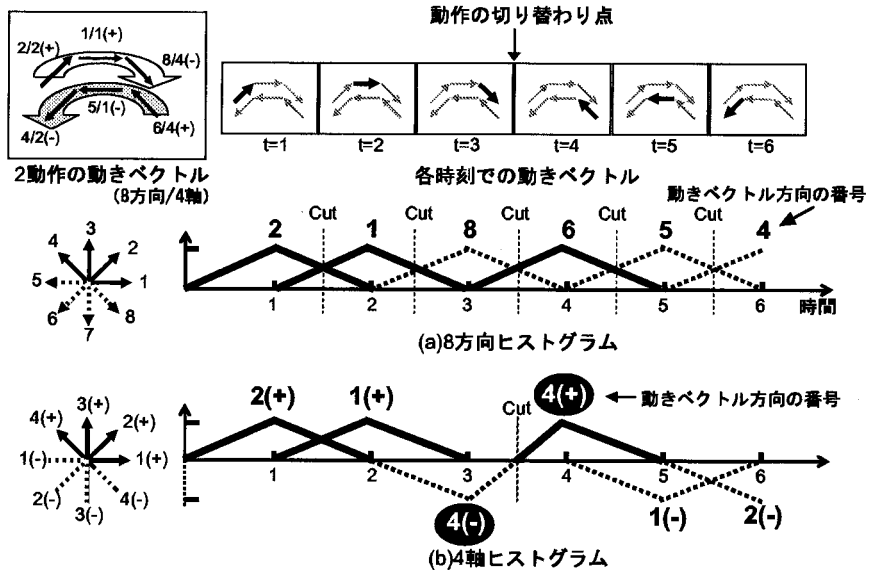


図6 動き方向ヒストグラムの変化量からのカット点検出（隣接方向への方向変化を含む動作の場合）

号が同時に反転しない場合があるが、反転する点は付近に存在する。ヒストグラム値が反転する際には、0に近い値をとることから、4軸のヒストグラム値の絶対値和が小さくなる点が、4軸が反転する点、つまりカット点となる。そこで、4軸のヒストグラム値の絶対値和を評価値とし、傾きが負から正に変化する点をカット点とし

て検出し、ショット分割を行う。4軸のヒストグラム値の絶対値和を式(3)に示す。

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

3.2 ショットのネジ締め作業判定

前節にて分割したショットの動作特徴量と時系列パターンを用いて、各ショットに対して作業の分類を行う。本稿では、各ショットに対してネジ締め作業か否かの判定を行う。

ネジの締め付け作業は、「締める」→「戻す」の動作を繰り返す作業であり、「締める」→「戻す」→「締める」→「戻す」→…→「戻す」というショットの時系列パターンが得られる。このとき、現ショット s_0 とその2つ前のショット s_2 は、「締める」または「戻す」の同一動作であり、この2ショットが連続して同一動作である場合、そのショットをネジ締め作業と判定する。この2ショットのそれぞれの動作特徴量 $\hat{h}_{s_0}(d_i)$, $\hat{h}_{s_2}(d_i)$ の類似度を式(4)により求め、閾値処理により同一動作か否かを判定する。次に、同一動作と判定された連続回数が閾値以上の場合、そのショットをネジ締め作業と判定する。

$$SSD_s = \sum_{i=0}^7 \{ \hat{h}_{s_0}(d_i) - \hat{h}_{s_2}(d_i) \}^2 \quad (4)$$

ただし、ショット ($t_s < t < t_e$) の動作特徴量 \hat{h}_s は、ショットに属す各フレームの動きベクトル方向ヒストグラムを積算し、正規化したものとする(式(5),(6))。

$$h_s = \sum_{t=t_s}^{t_e} h_s(d_i, t) \quad (5)$$

$$\hat{h}_s(d_i) = \frac{h_s(d_i)}{|h_s(d_i)|} \quad (6)$$

3.3 ネジ締め作業シーンの検出

ひとつのネジ毎に締め付け作業のショットを集め、ネジ締め作業シーンとして検出する。シーンの開始は、前節の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ショットとする。シーンの終了は以下の3つに従い、決定する。

(1) 動作特徴の類似性

同一ネジを締め付ける動作のショットは、ネジの軸が一致しているため、ほぼ同一の動作特徴量をもつ。3.2節で述べた類似度が閾値以下の場合、他の動作に移ったとして、終了とする。

(2) 停止ショットの検出

通常、ネジを締め付ける際には、まずレンチをネジにセットしてから作業に入る。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、作業シーンを区切ることが可能な場合が多い。動きが小さい停止ショットが入ることによって終了とする。

(3) ショット長の変化

上級作業者になるに従い、レンチのセット動作の時間は小さくなり、停止ショットが検出されない場合がある。



図7 取得画像例

そこで、締め付け始めは負荷が小さく、ショットの時間(ショット長)が小さいが、締め付けを繰り返すに従い、負荷が大きくなりショット長が伸びることに着目し、注目ショットとその前のショットのショット長を比較し、小さくなった場合についても、作業の終了とする。

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、提案するショット分割、ネジ締め作業判定、ネジ締め作業シーン検出を行った実験結果を示す。

4.1 実験の設定

この実験では、締め付けネジ数10個のA部品、ネジ数4個のB部品の2種類の組立作業に対して、それぞれ、10本、4本の作業映像を用いた。映像データは、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、サイズは160pixel × 120pixel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7に示す。

組み立て部品は治具で固定されるため、手や腕の動作領域を指定できる。動きベクトルを検出する領域を指定することで、頭部等の部位の動きの影響を軽減することが可能となる。この実験では、動きベクトルを検出する領域を(10,10)を左上の頂点として110pixel × 100pixelの矩形領域を手動で指定した。

用いた動きベクトルは、10pixel × 10pixelのブロックと、隣接したフレームの同位置にあるブロックの周囲に対してブロックマッチングを行い、絶対値誤差が最小となったブロックを動きベクトルの到達ブロックとして求めた。

4.2 ショット分割

ショット分割の評価は、提案手法により検出したカット点に対して目視にて正誤を判定し、正解検出率、誤検出率を次式から求めた。

$$\text{正解検出率} = \frac{\text{検出した正解数 } N_C}{\text{検出されるべき正解数 } N_G} \quad (7)$$

$$\text{誤検出率} = \frac{\text{誤検出した数 } N_M}{\text{実際に検出した数 } N_D} \quad (8)$$

ショット分割の実験結果を表1に示す。表1より高精度にショット分割が行われていることがわかる。ネジの締め付け動作は、動きが大きく方向の変化が明瞭であるため、高い検出率が得られたと考えられる。一般的に、速度は上がって下がる山形の変化をすることに対して、ひとつの動作中に速度の上下変化が複数発生した場合に誤検出が見られた。これは、締め付けトルクが大きくなる締め付け作業シーンの終了付近または、締め付け作業シーン間のレンチのセット動作で見られることが多く、シーンの検出に大きな影響はないと考えられる。

4.3 ショットのネジ締め作業判定

ショットの動作特徴量と時系列パターンを用いて、ショットがネジ締め作業か否かを判定する。ここでは、3回以上連続して現ショットとその2つ前のショットが同一動作と判定された場合、ネジ締め作業として判定した。ネジ締めショットの判定評価には、ショット単位で正誤を判定し、正解検出率、誤検出率を式(7)、(8)から求めた。同一動作を判定する類似度の閾値は実験的に0.2とした。

ショットの判定結果を表2に示す。ネジ締め作業ショットがネジ締め作業でないショットと判定される場合も、ネジ締め作業でないショットがネジ締めショットと誤判定される場合も、すべてシーンの開始ショット、終了ショットであった。ネジ締め作業シーンは多数の連続したショットから構成されるため、シーンの検出には、影響は小さいと考えられる。

4.4 ネジ締め作業シーンの検出

ネジ締め作業シーンを検出する。このシーンの数が締め付けたネジの個数と判断する。ネジ締め作業シーン検出の評価は、シーン単位で正誤を判定し、正解検出率、誤検出率を式(7)、(8)から求めた。

シーンの分割結果を表3に示す。表3の結果より、高精度にネジ締め作業シーンを検出できていることがわかる。

トルク情報のみで区別が困難であった2度締めの作業映像に対して作業シーンの検出を行ったところ、2度目の締め付け動作は繰り返し回数が3回未満であったため、作業シーンとして検出されなかった。

表1 ショット分割結果

N_G	N_D	N_C	N_M	正解検出率	誤検出率
2210	2247	2210	37	100%	1.6%

表2 ショットのネジ締め判定結果

N_G	N_D	N_C	N_M	正解検出率	誤検出率
1384	1304	1271	50	91.8%	3.8%

表3 ネジ締めシーン検出結果

N_G	N_D	N_C	N_M	正解検出率	誤検出率
116	114	112	1	96.6%	0.9%

検出ができなかった状況はすべて、締め付け作業中にレンチがすべり、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。そのため、両方が3回以上繰り返し動作を行ったと判断される場合、その逆に3回に達しない場合、一方が3回以上となる場合があり、正確に締め付けネジの個数をカウントできない場合もあった。この問題の解決には、トルク情報を併用も検討できると考える。

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、作業者の動作から作業パターンを抽出し、標準作業パターンと比較することで、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のショットに分割する手法、ショットの動作特徴量と時系列パターンからショットのネジ締め作業判定を行う手法、ネジ締め作業シーンを検出する処理について述べた。そして、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。

今後の課題として、部品の取り付け順序の評価、取付けを忘れた位置の検出のため、取り付け動作・部品の位置を特定する手法についても検討する。また、カメラ映像に加え、トルク情報など他のセンサ情報との併用を検討し、より信頼性の高いシステムの構築を目指す。

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-D-II, 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 (D-II)*, 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.