

カメラ画像系列を用いた産業用ロボットの異常動作検出

学生員 関 弘 和 (東京大学)
正 員 堀 洋 一 (東京大学)

Detection of Abnormal Movement of Industrial Robots Using Image Sequence

Hirokazu Seki, Student Member, Yoichi Hori, Member (The University of Tokyo)

In this paper, the monitoring system for industrial robots working in factories is proposed. This system detects different movement from learning and immediately reports to the operator. It has the advantage that there is no need to receive any signal from the robot controller because it only observes with a simple camera such as CCD. For the detection method, Eigenspace Method is used which is excellent in compression of image data and calculation of the correlation among images. Parametric Eigenspace Method is also used to detect abnormalities such as the speed of movement. Some experiment using 2-axis robot show the effectiveness of the proposed method.

キーワード : 産業用ロボット、異常検出システム、固有空間法、パラメトリック固有空間法

1. はじめに

産業用ロボットなどさまざまな機器において、その構成要素の故障や誤作動が生じた場合は、それを確実に検出し危険状態に陥らないようにすることが重要である。入力信号の誤り、制御対象の異常、環境の異常(外乱からの騒擾)、人為的な操作ミスなどによるシステムの不安定化が起こると、人間を含めた周辺へ危害を及ぼす可能性が考えられる。

例えば工場内で動いている産業用ロボットはその数も多く、すべてに対し故障検出をするには低コストで簡単に異常を検出するシステムが必要になる。解析的モデルからのアプローチとして、アクチュエータやセンサなど制御系を構成する要素が故障した場合に外乱オブザーバを用いて故障を検出するという設計方法が考えられている⁽¹⁾。本論文ではこれとは別のアプローチとして、CCDなどの簡単なカメラによるモニタリングでさまざまな異常動作を検出する方法について述べる。このシステムは監視対象の機器から何の信号も受ける必要はなく、全く独立したシステムである。

2. カメラ画像系列による異常検出

2.1 モニタリングシステムの実現イメージ 最初に、産業用ロボットの異常検出システムの実現イメージを図1に示す。ロボットを画像にとらえられる位置にカメラを設置し、異常な動きを検出すればすぐにオペレータに警報を発する。本論文では特に、教示された動きを繰り返すような産業用ロボットを想定する。このようなシステムに

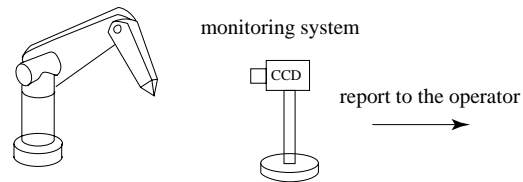


図1 実現イメージ

Fig. 1. Realization image of monitoring system

は、次のような利点がある。

- [1] 人間がいちいち見回って監視する必要はない。人間は離れていていいから安全である。
- [2] 異常時には画像によって正確かつ迅速に状況をとらえることができる。
- [3] 簡単なカメラ1つなので、低コストである。
- [4] 対象の機器自体に取り付けるわけではないので、どんな機器に対しても設置が簡単である。

2.2 ロボットの異常性の分類 ロボットに起こりうる異常で、カメラで検出できるものを3つに分類する。

[異常性 I] 教示した動きと異なる動き

あらかじめ教えておいた動きと異なる、つまり教示された軌道を外れるようなでたらめな動きは異常と判断する。

[異常性 II] 異なる速さで動く

教示した動きの軌道をきちんとたどっても、その動きの速さが教示した速さより速かったり遅かったりすれば異常

である。また、ロボットが止まってしまうという異常も、極端に遅い動きという意味でこれに含める。

[異常性 III] 教示した動きを部分的にのみ動く

例えば障害物などに衝突し、軌道を部分的にしかたどらない場合は異常である。

2.3 画像からのロボットの手先抽出 産業用ロボットのある工場でもモニタリングを行う場合、背景画像は複雑であり、単純な差分によってロボットの領域を切り出すことは難しいと考えられる。そこで本研究では、2軸ロボットの手にマーカーをつけ、その部分のみを画像から抽出することにする。カラー画像を用いることも考えられるが、今回は図2のように、手に白いマーカーをつけて、2値化により暗い背景から抽出した。本研究では2軸ロボットを

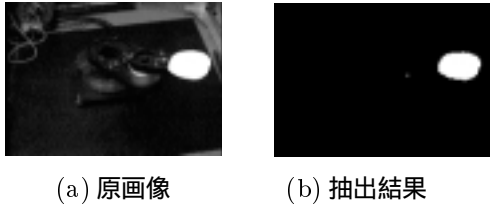


図2 ロボットの手先の抽出

Fig. 2. Extraction of the end of robot

用いて、振り子のように同じ軌跡の上を行きも帰りもたどるような動きについて考える。円軌道のように任意の場所で方向が決まっているような動きは比較的解析が簡単であるので、今回は前者の動きに焦点を当てて実験を行う。

筆者らは、カメラ画像系列を用いて高齢者の異常動作を検出するシステムを提案した⁽²⁾。これは、固有空間法を用いて学習画像と相関の低い画像を異常として検出し、また動きの速さや方向の検出も行なったものである。本研究ではこの方法に基づきロボットの異常検出を行なう。

3. 正常な動きの学習

3.1 固有空間法 ここで、固有空間法を画像に適用する場合の原理について述べる。次元 N の画像ベクトルを $\mathbf{y}_i (i = 1, \dots, I : I$ はサンプル数) とする。

$$\mathbf{y}_i = [y_1^{(i)}, y_2^{(i)}, \dots, y_N^{(i)}]^T \quad (1)$$

全学習画像ベクトル $\mathbf{y}_i (i = 1, \dots, n)$ の平均 \mathbf{c}

$$\mathbf{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{y}_i \quad (2)$$

を計算し、次に各画像ベクトルから平均 \mathbf{c} を差し引き、行列 \mathbf{Y} を求める。

$$\mathbf{Y} \equiv [\mathbf{y}_1 - \mathbf{c}, \mathbf{y}_2 - \mathbf{c}, \dots, \mathbf{y}_n - \mathbf{c}] \quad (3)$$

画像集合の共分散行列 \mathbf{Q} は式(4)で表される。

$$\mathbf{Q} \equiv \mathbf{Y}\mathbf{Y}^T \quad (4)$$

固有空間 (例えば k 次元) は次の固有方程式

$$\lambda_i \mathbf{e}_i = \mathbf{Q}\mathbf{e}_i \quad (5)$$

を解き、 k 個の大きい固有値 ($\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_k \geq \dots \geq \lambda_K$) に対応する固有ベクトル ($\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_k$) を基底ベクトルとすることにより得られる。十分小さい固有値を無視することで、学習画像の次元を落とすことが可能となる。有効な次元の決定には、式(6)の固有値寄与率 W_k と適当なしきい値 T_s を用いる。

$$W_k = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{i=1}^K \lambda_i} \geq T_s \quad (6)$$

ここで1枚の画像 (次元 N) は、式(7)により次元 k の固有空間ベクトル (空間上の1点) へ投影される。

$$\mathbf{z}_i = [\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_k]^T (\mathbf{y}_i - \mathbf{c}) \quad (7)$$

固有空間は画像間の相関値が空間上の距離値に対応するため、画像間相関の計算に対して優れた性質をもっている。空間上の2点間の距離が小さいことはその2枚の画像の相関が高いことを示す。また、距離が大きいかは相関が低いことを示し、学習画像との比較で異常性を検出できる。

3.2 パラメトリック固有空間法 向きや大きさにおける連続的な画像の変化を考えた場合、連続する画像間の相関は高くなるため、その画像系列に対応する固有空間上の点はスムーズな軌跡を描く。パラメトリック固有空間法は、パラメトリックに変化する画像を固有空間中の多様体で表現する手法である。対象物体のポーズ、光源の位置をパラメータにした物体認識⁽³⁾、時間をパラメータにした人間の動作解析⁽²⁾⁽⁴⁾などの例がある。

3.3 正常な動きの表現 学習段階では、ロボットの正しい動きを固有空間上の点集合として表現する。ロボットの正しい動き (1サイクル分) を撮影した画像集合から固有空間を構築し、各画像の投影点を蓄えておく。本研究では、図3(a)のように関節角度 q_1, q_2 に正弦波の指令値を与え、振り子のような動きをする場合を考えるが、このときの画像系列から固有空間を構築すると図3(b)のようになる。

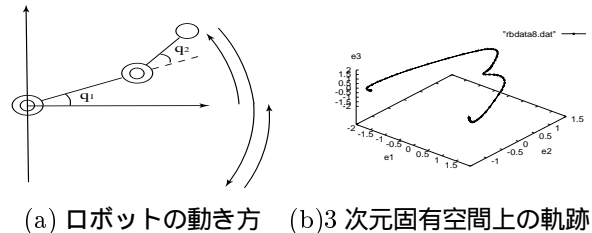


図3 正常な動きの学習

Fig. 3. Learning of the normal movement

4. 異常な動きの検出

4.1 異常性 I の検出 学習と異なる動き、つまり学習により得られた(静止)画像のいずれとも異なるような(静止)画像が入力されれば異常と判断しなければならない。そこで、それらの画像は学習画像との相関が低いものと解釈して検出する。上述のように、固有空間上の距離は画像間の相関を表すので、学習にない異常な動きを固有空間上の距離の大きさで検出する。学習画像の投影点集合 f_i と入力画像の投影点 $z(t)$ との最小距離 d_1 を計算し、これが大きくなれば異常と判断する。

$$d_1^2 = \min_j \|z(t) - f_j\|^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$d_1 > d_{\text{thre}} \rightarrow \text{abnormal}$$

実験には以下のような画像系列を用いる。

(学習) : 指令値に正弦波を与える

(入力) : 正弦波の振幅を 2 倍にしたもの (abnormal) 学習

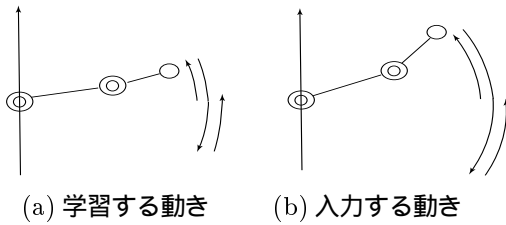


図 4 ロボットの動き方
Fig. 4. Movement of robot

画像集合から構築した固有空間(図 5(a))に、入力画像系列を投影したときの軌跡を図 5(b) に示す。

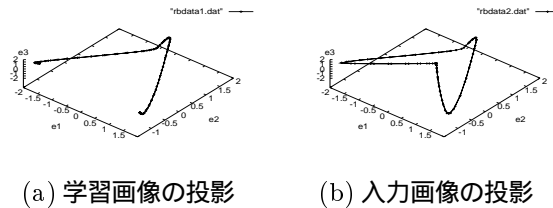
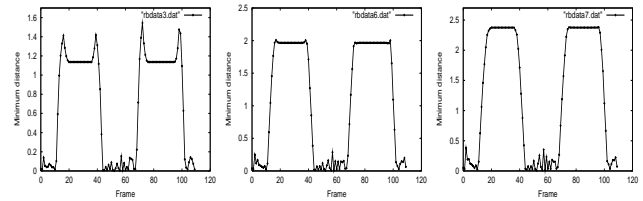


図 5 3次元固有空間上の投影軌跡

Fig. 5. Projected locus in the 3-dimensional eigenspace

次元が 7 のとき固有値寄与率 $W_k = 0.9$ となる。図 6 に固有空間の次元が 3, 5, 7 のときの最小距離 d_1 を示す。いずれの場合もロボットが端まで来たとき d_1 が大きくなり、あるしきい値(例えば 3次元のときには $d_{\text{thre}} = 0.5$)を設けることで異常と判断できる。

4.2 異常性 II の検出 先程のような単なる投影点どうしの比較では、ロボットの動きの速さは検出できない。そこでパラメトリック固有空間法⁽⁴⁾を用いて、固有空間上



(a) 3次元固有空間 (b) 5次元固有空間 (c) 7次元固有空間

図 6 固有空間上での最小距離 d_1

Fig. 6. Minimum distance in the eigenspace

の軌跡どうしの比較を行なう。動画像間の距離を式(9)のように、固有空間上の軌跡の間の距離で定義する。

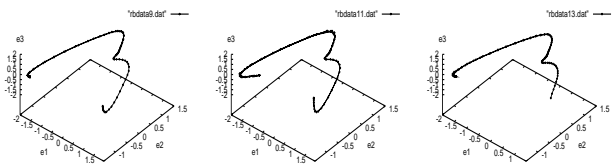
$$d_2^2 = \min_{a,b} \sum_{t=1}^T \|z(t) - f(at+b)\|^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$\tilde{a} = \arg \min_a \sum_{t=1}^T \|z(t) - f(at+b)\|^2 \dots\dots\dots (10)$$

a は時間伸縮、 b は時間シフトのパラメータである。この 2つのパラメータを導入して最小距離をもつ軌跡を求めたときの時間伸縮 \tilde{a} に注目すると、その絶対値は速さを表すと考えられる。実験では $T = 5$ 、つまり入力画像系列を 5 フレームずつとって、学習軌跡と比較することにする。正弦波の指令値を与え、図 3(b) のような固有空間が構築されたとする。そのとき、入力画像系列として以下のような 3つのパターンを用意する。

- (a) 学習と同じ速さの動き (正弦波の周期: 24 秒 normal)
- (b) 学習より速い動き (正弦波の周期: 12 秒 abnormal)
- (c) 学習より遅い動き (正弦波の周期: 32 秒 abnormal)

これらの入力画像系列を図 3(b) の固有空間に投影したときに描く軌跡を図 7 に示す。固有空間上では学習の軌跡と同じ軌跡をたどっている。それぞれの入力画像系列に対する



(a) 学習と同じ (b) 学習より速い (c) 学習より遅い

図 7 入力画像系列の投影軌跡

Fig. 7. Projected locus of input image sequence

\tilde{a} の計算結果を図 8 に示す。 \tilde{a} の値に速さの情報が反映しており、例えばしきい値を 0.75 と 1.25 などとすれば学習と異なる速さの検出ができる。所々で \tilde{a} の値が 0 になっているが、これはロボットが折り返し地点にきたときに少しの時間停止しているためである。また、動きが途中で ($t = 65 \sim$) 止まってしまう画像系列を入力すると、 \tilde{a} の値は図 9(b) の

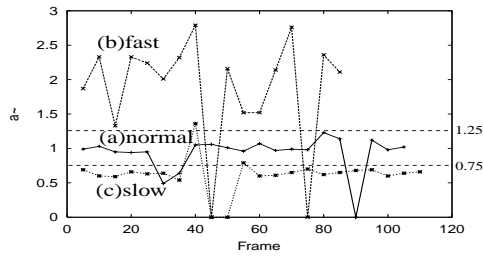


図8 3つの入力画像系列に対する $\tilde{\alpha}$ の値

Fig. 8. Value of $\tilde{\alpha}$ for input image sequences

ようになる。 $\tilde{\alpha}$ の値がほぼ0である状態が長き、ロボットは止まったと判断する。

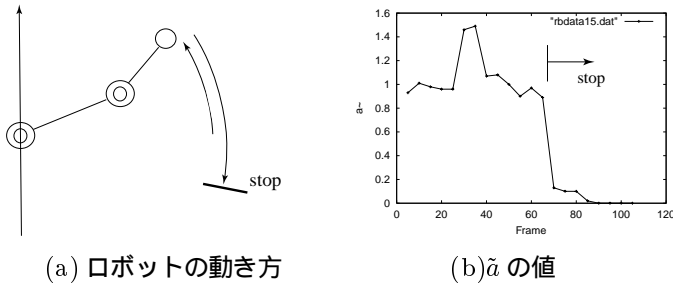


図9 ロボットが止まる異常の検出

Fig. 9. Detection of stopping of robot

4.3 異常性 III の検出 障害物にあたりそこから逆方向へ動き出したりして軌跡を完全にたどらないような場合を考える。これは前述の2つの方法では検出できない。軌跡を順番通りにたどるかどうかを調べるために、前の5フレーム $z_{i-1}(t)$ の計算のときに求めた \tilde{b}_{i-1} の値を利用する。学習どおりに正しく動いていれば、次の5フレーム $z_i(t)$ は $\tilde{b}_{i-1} + 5$ 付近の軌跡に近いだらうという予測がたつので、 $\tilde{b}_{i-1} < b < \tilde{b}_{i-1} + \alpha$ の範囲に限定して式(11)の計算をする。もしそこで逆方向に動き出したりして、本来の軌跡の順番から外れると、 d_3 の値が大きくなるはずである。

$$d_3^2 = \min_{a, \tilde{b}_{i-1} < b < \tilde{b}_{i-1} + \alpha} \sum_{t=1}^{T(=5)} \|z_i(t) - f(at + b)\|^2 \quad (11)$$

$$\tilde{b}_i = \arg \min_{\tilde{b}_{i-1} < b < \tilde{b}_{i-1} + \alpha} \sum_{t=1}^{T(=5)} \|z_i(t) - f(at + b)\|^2 \quad (12)$$

実験では α の値を15とした。この式を用いることにより、速さの検出(式(9))の計算時間も短縮できる。実験には以下のような画像系列を用いる。

- (a) 学習と同じ動き (normal)
- (b) 途中で($t = 35 \sim$)逆方向に動き出す (abnormal)

d_3 の値の計算結果を図11(b)に示す。逆方向に動き出したときから d_3 の値が大きくなるので、異常と判断できる。

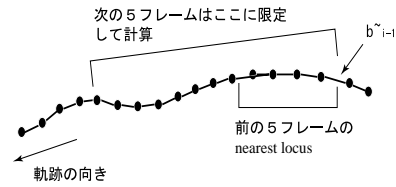


図10 探索する学習軌跡の限定

Fig. 10. Restriction of compared locus

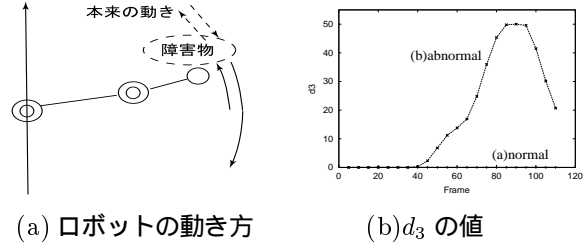


図11 異常性 III の検出

Fig. 11. Detection of abnormality III

5. まとめ

本論文では、産業用ロボットをカメラでモニタリングし故障などによる異常な動きを検出するシステムの実現方法について述べた。画像データの圧縮と画像間の相関の計算に優れた性質をもつ固有空間法を用い、異なる動き、速さなど3種類の異常性を検出した。実験では振り子のような動きに対して異常検出を行ったが、円軌道を描く場合やその他複雑な動きに対しても適用可能であると考えられる。また、冗長ロボットなど関節が多いロボットに対しては、手先だけでなく各関節にマーカをつけて同じように適用することもできるであろう。この方法は高齢者モニタリングの方法⁽²⁾として用いたが、この他にも交通状況の監視などさまざまなケースに適用できると考えられる。ロボットの手先の抽出方法には単なる2値化を用いたが、実際の工場では背景がより複雑になるので、カラー情報等を用いた別の方法を考えることが今後の課題となる。

文献

- (1) T. Suzuki and M. Tomizuka, "Joint synthesis of fault detection and controller based on structure of two-degree-of-freedom control system", *Proc. of the 38th Conference on Decision and Control* pp. 3599-3604 (1999).
- (2) H. Seki and Y. Hori, "Detection of abnormal human action using image sequences", *Proc. of IPEC-2000*, Vol. 3, pp.1272-1277 (2000).
- (3) H. Murase and S. K. Nayar, "Visual Learning and Recognition of 3-D Objects from Appearance", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 14, pp.5-24 (1995).
- (4) H. Murase and R. Sakai, "Moving object recognition in eigenspace representation: Gait analysis and lip reading", *Pattern Recognition Letters*, Vol. 17, pp.155-162 (1996).