

カメラ画像系列の固有空間表現に基づく 産業用ロボットの異常動作検出

学生員 関 弘和* 正員 堀 洋一*

Detection of Abnormal Movement of Industrial Robot
Based on Eigenspace Representation of Image Sequence

Hirokazu Seki*, Student Member, Yoichi Hori*, Member

In this paper, a 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 a CCD camera. 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 experiments using 2-axis robot show the effectiveness of the proposed method.

キーワード：産業用ロボット, モニタリングシステム, 異常検出, 固有空間法, パラメトリック固有空間法, 黄金分割法

Keywords: industrial robot, monitoring system, abnormality detection, Eigenspace Method, Parametric Eigenspace Method, Golden Section Method

1. はじめに

世界中で稼働している産業用ロボットのうち半数以上は日本で動いているが、一方、産業用ロボットに絡んだ死亡事故についても日本での件数が圧倒的に多い⁽¹⁾。例えば産業用ロボットの場合、暴走によって把持していた物体を放り出すケースなど、何らかの事故につながる危険性がある。安全確保のための信頼性の高いシステムが求められていることは言うまでもない。現在では、高信頼化された自己故障診断機能が必須技術となっており、CPU、入出力インタフェース、電源装置、サーボ装置などにおいてリアルタイムの監視と異常(故障)通報を行っている⁽²⁾。例えば現在の工場ラインでは、サーボアンプやコントローラにおいて過電流やオーバーヒート等のアンプ関係の異常、偏差過大、位置決め時間等の異常を検出し、システムを安全側で停止させるという形がとられている。

また、解析的モデルから異常検出へ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も考えられている⁽³⁾。

しかし、このようにロボット自身に依存した異常検出シ

ステムでは高い信頼性は得られない。例えば、大きな加速度のため機械が疲労し、軸のたわみや振動が発生し、サーボアンプやコントローラは正しいと判断していても実はロボットの先端は正しく動作していないというケースもあり、従来のシステムでは検出できない異常動作が存在する。センサやアクチュエータそのものが故障したときにはフェールセーフにより安全側に停止させる対策が施されることがあるが、ロボットの制御系とは全く独立した新しい異常検出システムが必要であるとも考えられ始めている。

そこで本論文では、CCD等の簡単なカメラによるモニタリングにより産業用ロボットの様々な異常動作を検出するという、あまり例のなかった試みに対し、意義や位置づけを明確にするとともに、その検出手法について提案する。

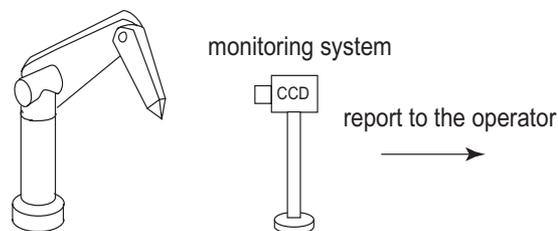


図1 産業用ロボットのモニタリングシステム

Fig. 1. Monitoring system for industrial robot.

システムの実現に際しては、道路や施設内監視のモニタリングシステムと同様、設置や信号伝送、据え付け調整について当然考慮する必要がある。しかし、このモニタリン

*東京大学工学系研究科電気工学専攻

Department of Electrical Engineering, Division of Engineering, University of Tokyo

グシステムは監視対象のロボットから何の信号も受ける必要がなく、ロボットの制御系とは全く独立したシステムであるという利点をもつ。また、工場内で動いている産業用ロボットはその数も多く、それらすべてに対し異常動作検出を行うには、本システムのような簡単なシステムの実現が望まれる。さらに、CCD カメラ等をそばに置くだけのモニタリングシステムには、ロボット制御システムの中に組み込む必要がないため、工場内の既存のロボットにも容易に適用できるという利点もある。

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、モニタリングによる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は、次のような利点がある。

- [1] 監視対象のロボットから何の信号も受ける必要がない、全く独立した異常検出システムである。
- [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ため、適切な対応がとれる。
- [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、既存のあらゆる機器に対して設置が簡単である。

2.2 ロボットの異常動作の分類 産業用ロボットに起こりうる異常で、カメラ画像により検出できるものを以下のように分類する。

[異常動作 (I)] 教示した動きと異なる動き

位置指令値からずれる、つまりあらかじめ教示した軌道から外れるようなでたらめな動きは異常と判断する。例えば、角を描く教示軌跡を高速動作すると、角の教示点を通過せず角が丸みを帯びた軌跡になる。また、急激な速度変動、停止の際にアームが振動することもあり、これらの異常動作を検出する必要がある。

[異常動作 (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。ただし、学習動作を基準として数%のわずかな速度異常までも検出する必要はなく、例えば50%程度以上の速度異常を検出して停止させることができれば十分であると考えられる。

暴走などの異常動作が起きた際、もしその検出に時間がかかり停止が遅れると、まわりに危害を及ぼすなどの危険性が増すと考えられる。そのため本研究では、これら二つの異常動作をその発生時点からより短時間で検出することを目的の一つとする。

2.3 実験における撮影画像 産業用ロボットのあ

る工場では、ロボットを撮影した濃淡画像の一例である。本研究で適用する固有空間法は、このようにして得られた画像の濃淡値をそのまま適用でき、さらにデータ圧縮も行うため、異常発生時から短時間で検出に適している。今回の実験では、90×120の画像サイズを用いている。

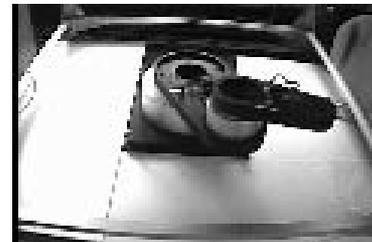


図2 撮影されるロボットの画像例

Fig. 2. Example of the captured image.

筆者らは、カメラ画像系列を用いて高齢者の非日常的な動作を検出するモニタリングシステムを提案している⁽⁵⁾。これは、固有空間法を用いて学習にない非日常的動作を検出し、動きの速さ等の検出も行ったものである。本研究でもこの方法に基づいてロボットの異常動作検出を行う。

3. 正常な動きの学習

3.1 固有空間法 ここで、固有空間法を画像データに適用する場合の原理について述べる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。正規化された次元 N の画像ベクトルを $y_i (i = 1, \dots, I : I$ はサンプル数) とする。

$$y_i = [y_1^{(i)}, y_2^{(i)}, \dots, y_N^{(i)}]^T \dots \dots \dots (1)$$

全サンプル画像ベクトル $y_i (i = 1, \dots, n)$ の平均 c

$$c = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I y_i \dots \dots \dots (2)$$

を計算し、次に各画像ベクトルから平均 c を差し引き、行列 Y を求める。

$$Y \equiv [y_1 - c, y_2 - c, \dots, y_n - c] \dots \dots \dots (3)$$

このとき、画像集合の共分散行列 Q は式 (4) で表される。

$$Q \equiv YY^T \dots \dots \dots (4)$$

固有空間 (例えば k 次元) は次の固有方程式

$$\lambda_i e_i = Q e_i \dots \dots \dots (5)$$

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 (e_1, \dots, 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、サンプル画像の次元を落とすことが可能となる。有効な次数の決定には、式 (6) の固有値寄与率 W_k と適当な閾値 T_s を用いる。しきい値 T_s には 0.8 や 0.9 という値が用いられることが多い。

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

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

$$z_i = [e_1, \dots, e_k]^T (y_i - c) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、2枚の画像 y_m, y_n が固有空間上の2点 g_m, g_n にそれぞれ投影されるとすると、その画像間の相関 $y_m^T y_n$ が大きければ固有空間上の2点間距離 $\|g_m - g_n\|$ は小さくなるのが数学的に示されている⁽⁶⁾。また、数万次元の画像データが数次元(例えば3次元や4次元)ベクトルで表現されるため、4桁のデータ圧縮が可能である。よって、固有空間法は画像間相関の計算と画像データの圧縮において非常に優れた性質をもっており、これまで顔画像の認識⁽⁸⁾やジェスチャーの認識⁽⁹⁾などにも用いられてきた。本研究では、学習にない異常な動作の画像は、学習画像との相関が低いと考え、学習画像の投影点との距離を測ることで異常動作を検出する。

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図3のようにスムーズな軌跡を描く。パラメトリック固有空間法は、あるパラメータの変化とともに移り変わっていく画像系列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⁽⁶⁾、時間をパラメータにした人間の動作解析⁽⁷⁾などの例がある。

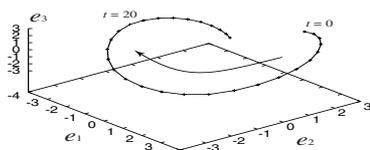


図3 パラメトリック固有空間法

Fig. 3. Parametric Eigenspace Method.

3.3 正常な動作の表現 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(点列)として表現する。ロボットの正しい動き(数サイクル分)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。

4. 異常な動きの検出

4.1 異常動作(I)の検出 学習と異なる動き、つまり学習として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をを用いて検出する。学習画像の投影点集合 f_i と時間 t における入力画像の投影点 $h(t)$ との最小距離 d_1 を計算し、これがある閾値 d_{th} より大きくなれば異常と判断

する。

$$d_1 = \min_j \|z(t) - h_j\| > d_{th} \rightarrow \text{abnormal} \dots (8)$$

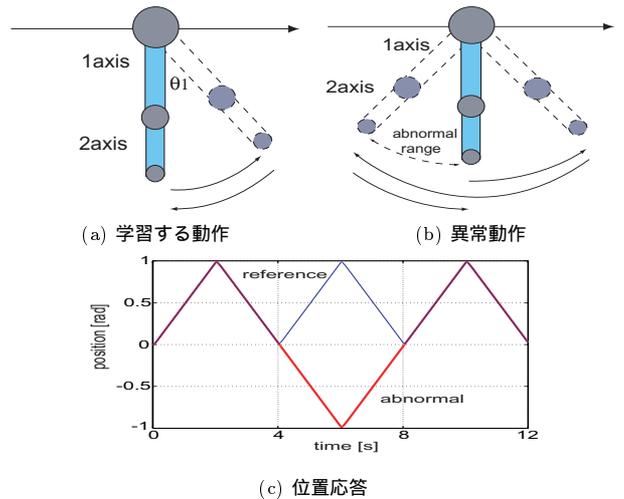


図4 実験におけるロボットの動作

Fig. 4. Movement of the robot.

静止画像比較による異常動作検出の実験例として、図4のような動きを用いる。ロボットの各関節の位置制御系には、2自由度ロボ制御⁽¹⁰⁾を用いている。

図4(a)の学習画像集合から構築した固有空間と、その投影点列が描く軌跡を図5に示す。また、固有値寄与率は図6のようになり、次元が10のとき固有値寄与率 $W_{10} = 0.906$ となるため、後の解析は10次元固有空間で行うこととする。

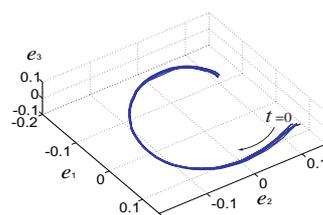


図5 3次元固有空間上への投影軌跡

Fig. 5. Projected locus onto 3-dimensional eigenspace.

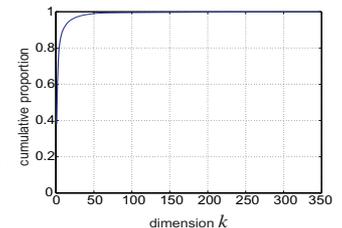


図6 固有値寄与率

Fig. 6. Cumulative proportion of eigenvalue.

この学習結果に対し、図4のように $t = 4 \sim 8[s]$ で関節角度が負のほうに動いてしまう異常動作を用意する。図7は、これを撮影した各画像に対し、学習画像の中から最大相関値をもつものを探索した結果である。画像ベクトルは正規化しているため、学習画像の中に似た画像があれば最大相関値はほぼ1となる。一方、 $t = 4 \sim 8[s]$ においては学習画像の中に似たような画像が存在しないため、最大相関値は小さくなる。これに基づいて異常動作検出も行えるが、計算時間が膨大になるため短時間での検出は不可能である。また、画像サイズによってはその検出に要する時間がさらに増えてしまう。

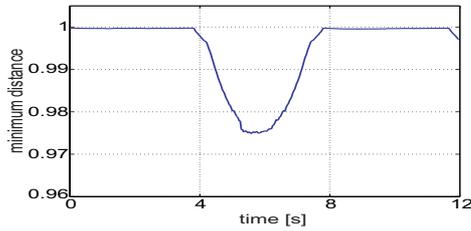


図7 最大相関値の計算結果

Fig. 7. Calculation result of maximum correlation.

次に固有空間法を適用して異常動作検出を行った結果を示す。図8は、10次元固有空間において式(8)のように学習画像の投影点集合から最小距離をもつものを探索した結果である。異常動作をしている $t = 4 \sim 8[s]$ での最小距離 d_1 が大きくなり、ある閾値 d_{th} により検出が可能である。

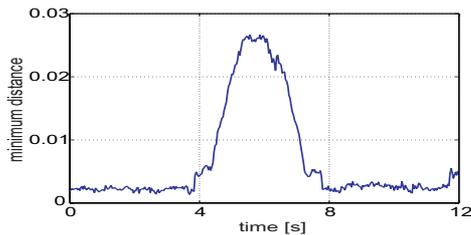


図8 10次元固有空間における最小距離 d_1

Fig. 8. Minimum distance d_1 in 10-dimensional eigenspace.

以下の表は最大相関値を探索する方法(図7)と固有空間法(図8)それぞれにおいて要した計算時間を比較したものである。ただし画像のキャプチャに費した時間は含まれていない。固有空間法を用いた場合には、1枚の入力画像に対し約37msであり、最大相関値を求める手法のほぼ30分の1の時間ですむ。産業用ロボットの異常動作検出をその発生時点からより短い時間で行うという目的において、本手法は適している。

	Calculation of maximum correlation	Eigenspace Method
The number of input images	348	348
Total calculation time	315.46[s]	12.87[s]
Calculation time per one image	906[ms]	37[ms]

4.2 異常動作(II)の検出 異常動作(I)の検出のように、単なる静止画像どうし、つまり固有空間上の投影点どうしの比較ではロボットの動きの速さは検出不可能であり、動画どうしの比較方法が必要になる。そこでパラメトリック固有空間法⁽⁷⁾を用いて、固有空間上の軌跡どうしの比較を行う。動画間の距離を式(9)のように、固有空間上の軌跡間の距離で定義する。

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

$$\tilde{a}(u) = \{ a \mid \min_{a,b} \sum_{t=1}^T \|z(t+uT) - h(at+b)\| \} (10)$$

T は1画像系列における画像枚数、 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 a, b を導入して、 u 番目の入力画像系列の投影軌跡 $z(t+uT)$ に最も距離の近い学習画像系列の投影軌跡 $h(at+b)$ を求めたときの時間伸縮パラメータ \tilde{a} に注目すると、その絶対値は動きの速さ、符号は動きの方向を表すと考えられる。

- if $\tilde{a} < -1$, 反対方向で速い動き
- if $-1 \leq \tilde{a} < 0$, 反対方向で遅い動き
- if $0 \leq \tilde{a} < 1$, 同じ方向で遅い動き
- if $1 \leq \tilde{a}$, 同じ方向で速い動き

ここで、式(9)の計算に黄金分割法を適用する。右辺は2つのパラメータ a, b を変数とした関数になっている。

$$f(a, b, u) = \sum_{t=1}^T \|z(t+uT) - h(at+b)\| \dots (11)$$

ある入力画像系列(ある u) に対して、2つのパラメータ a, b を変化させたときの $f(a, b, u)$ の値をプロットすると図9のようになり、単峰性を示す。そこで、 $f(a, b, u)$ の最小値を求める手段として2次元の黄金分割法を用いる。

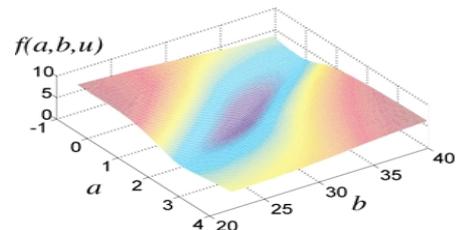


図9 $f(a, b, u)$ のプロット例

Fig. 9. $f(a, b, u)$.

1変数関数の場合は、図10のように探索区間 $[x_1^k, x_2^k]$ を黄金分割比で分割した点 u^k, v^k を求め、 $f(u^k), f(v^k)$ の値の大小によって探索範囲を狭めていく。 $v^k = u^{k+1}$ となるから $f(u^{k+1})$ は計算する必要がない。2変数関数の場合は、図11のように、ある試行点 g_1 で勾配を求め、その方向における最小値を求めて新たな試行点 g_2 とし、これを繰り返していく。

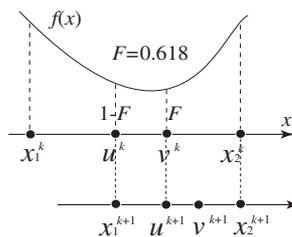


図10 黄金分割法

Fig. 10. Golden Section Method.

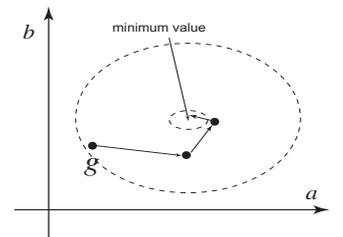


図11 探索例

Fig. 11. Example of convergence.

本実験では式(9)において $T = 10$ 、つまり入力画像を10フレームずつとって、学習軌跡と比較することにする。また u 番目の画像系列において、初期試行点 $x_1^1 = (a_1^1, b_1^1)$ には

$u-1$ 番目の画像系列に対する計算結果 ($\tilde{a}(u-1), \tilde{b}(u-1)$) を用いる。

$$a_1^1 = \tilde{a}(u-1) \dots\dots\dots (12)$$

$$b_1^1 = \tilde{b}(u-1) + 10\tilde{a}(u-1) \dots\dots\dots (13)$$

これは、前の 10 フレームの計算結果から次の 10 フレームの入力軌跡に近い学習軌跡を予測していることになる。

動画像比較による異常動作検出実験の例として、図 12 のような動作を用いる。ロボットの先端を、A-B-C-B-D-A の順にたどるように移動させる。A,B,C,D の作業空間座標をあらかじめ与え、作業空間指令値をニュートン法の反復計算により関節空間指令値に変換し、2 自由度ロボット制御系で制御を行った⁽¹⁰⁾。

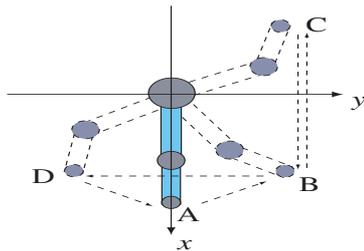


図 12 実験に用いる動作

Fig. 12. Movement of the robot.

図 13 は、A-B-C-B-D-A の順にたどるような学習動作の画像系列から構築した 3 次元固有空間と投影点列の描く軌跡を示したものである。また、図 14 は固有値寄与率を示す。15 次元で $W_{15} = 0.901$ となるため、後の解析では 15 次元固有空間を用いることとする。

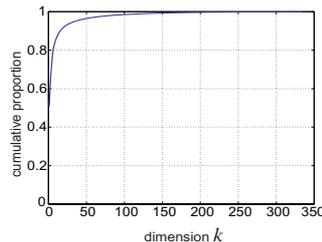
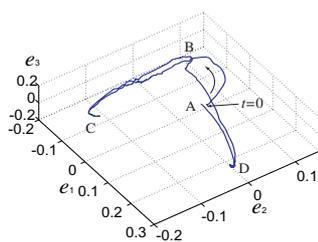


図 13 3次元固有空間上への投影軌跡

図 14 固有値寄与率

Fig. 13. Projected locus onto of eigenvalue. 3-dimensional eigenspace.

Fig. 14. Cumulative proportion

この学習結果に基づき、動画像どうしの比較により異常な速さの解析を行う。図 15 に学習動作と入力する異常動作の速度応答を示す。この速度は、ロボットの先端の作業空間における速度である。学習動作と入力異常動作の比較は次のとおりである。

- A-B 間：学習と同じ速度
- B-C 間：学習の $\frac{1}{2}$ の速度
- C-B 間：学習の 1.5 倍の速度
- B-D 間：学習の 1.5 倍の速度
- D-A 間：学習と同じ速度

この入力画像系列に対して、15 次元固有空間での \tilde{a} の計

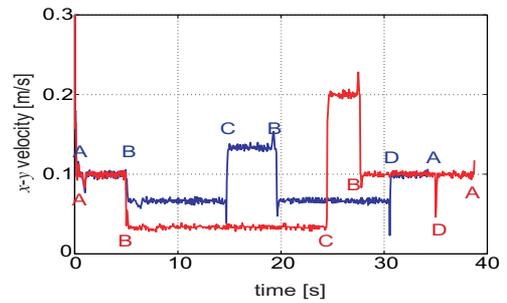


図 15 $x-y$ 平面における速度

Fig. 15. Velocity response in $x-y$ plane.

算結果を図 16 に示す。 \tilde{a} の値に速さの情報が反映しており、学習動作を基準としてその何倍の速度をもつかという解析が行えることがわかる。例えば上限 0.8、下限 1.2 の閾値を設定することで、学習動作の 1.5 倍、あるいは 0.5 倍という速度異常を検出できる。つまり、学習動作を基準として少なくとも 50 % 程度の速度異常の検出が可能である。

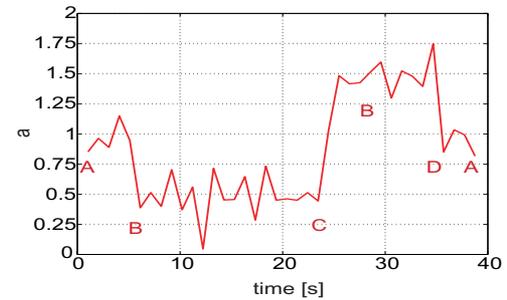


図 16 \tilde{a} の計算結果

Fig. 16. Calculation result of \tilde{a} .

黄金分割法を用いた場合に、1 画像系列 (画像 10 枚) に対して \tilde{a} を計算するのに要した時間は約 30ms ほどである。画像サイズなどによっても計算時間は当然変わるが、黄金分割法を用いることで大幅に短縮できる。画像 1 枚の撮像に 33ms 要するとすると、10 枚撮像する時間 330ms にこの計算時間約 30ms を合わせて、約 360ms ごとに速度情報が解析できることがわかる。パラメトリック固有空間法と黄金分割法を用いたことで、このように極めて短い時間でロボットの速度解析が可能となり、異常発生から短時間で検出をして警報を鳴らしたいという本研究の目的に適している。

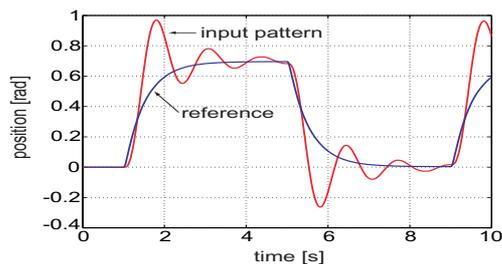
5. 具体的な異常動作検出例

固有空間法を利用した静止画像間、動画像間の比較により、ロボットの異常動作が可能であることを示してきたが、ここで、産業用ロボットに実際に起きうる具体的な異常動作を模擬し、どのように検出されるかを検証する。

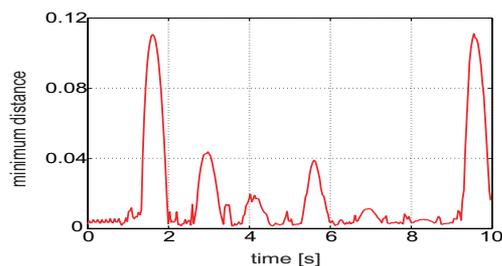
5.1 オーバーシュート・振動 冒頭で述べたように産業用ロボットにおいて、大きな加速度のために機械的な劣化や軸のたわみが発生し、オーバーシュートや振動などの現象が起きうる。また、ロボットの制御手法によっては急激な速度変動や停止の場合に同様な現象が起きうる。

このような異常動作を模擬し、固有空間法によってその検出を試みる。1軸に0.7[rad]のステップ目標値を与え、2自由度位置制御における目標値応答特性を適切に設定することで、図17(a)に示すような学習動作、異常動作を模擬した。異常動作におけるオーバーシュートは、目標値応答特性の減衰係数を1より小さくすることで実現している。

この異常動作は、異常動作(I)、つまり静止画像間の比較により検出する。式(8)に基づき、固有空間上の最小距離を求めた結果が図17(b)である。例えば d_1 の閾値を0.01に設定すると、1.8秒、3.0秒、4.2秒、5.7秒、7.0秒、9.5秒における異常動作を検出でき、図17(a)のオーバーシュートの様子と一致する。このように、教示点を行き過ぎてしまうような動作を検出できる。



(a) 位置応答



(b) d_1 の計算結果

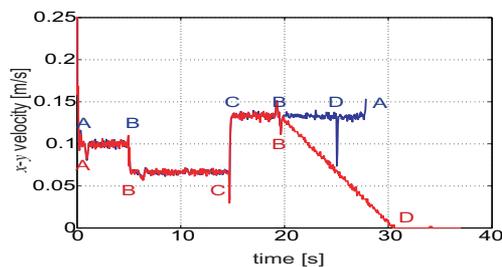
図17 位置応答と d_1 の計算結果

Fig. 17. Position response and d_1 .

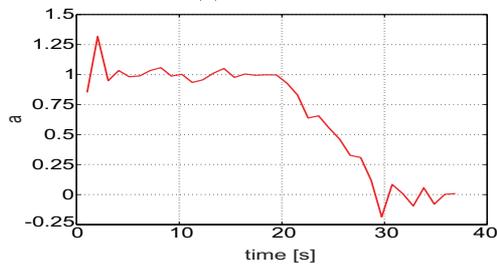
5.2 速度異常・停止 次に、何らかの構成要素の故障等によりロボットが停止してしまうような場合について検出を試みる。前節での速度解析に用いた動作と同様に、作業空間における教示点をたどる動作を用いる。図18(a)に示すように、 $t = 20$ 以降、BからDへ移動する際に、速度が徐々に落ちていき停止する動作を用意した。

この異常動作は、異常動作(II)、つまり動画間比較により検出する。式(9)と黄金分割法に基づき速度の解析を行った結果が図18(b)である。例えば \tilde{a} の閾値を0.75に設定すると、22秒の時点で閾値を越え速度異常と判定するが、図18(a)において、22秒の時点での速度が学習動作の約0.75倍になっており一致する。このようにして、停止してしまうような速度異常も検出できる。

このように、異常動作(I)(II)の検出、つまり固有空間法を用いた静止画像間比較・動画間比較を並行して行うことで、暴走、オーバーシュート、速度異常、停止等の異常動作をその発生時点から数十ミリ秒ほどの短い時間で検出し、警報を鳴らすことができる。



(a) 速度応答



(b) \tilde{a} の計算結果

図18 速度応答と \tilde{a} の計算結果

Fig. 18. Velocity response and \tilde{a} .

実際の産業用ロボットは3次元的に運動する場合がほとんどであるが、本手法を適用した際、奥行き方向の動作が画像変化としてあまり現れないような場合は検出が困難となる。対策方法として、別の角度からもう一台のカメラで解析し、2台のカメラで総合的に判断するようなことは可能である。また、実際の工場で適用する場合、照明条件や背景画像の変化の影響を考慮する必要がある。固有空間法は、画像全体のグローバルな情報を用いて照合する手法であり⁽¹¹⁾、多少の画像中の雑音などは平均化するが、光源の位置が大きく変化したり背景画像が全く変わったりすると、それらの画像を適応的に随時学習し直すなどの対策が必要となる。このように実際の産業用ロボットに適用する上でこの本手法の定量的評価については今後の検討課題となる。

我々は以前、高齢者の非日常的な動作を検出するモニタリングシステム⁽⁵⁾において固有空間法を用いた手法を提案した。本論文で産業用ロボットの異常動作検出のために用いた手法はこれとほぼ同様の手法である。しかし、本研究では画像中の対象領域をシルエットとして抽出することはせず、濃淡画像をそのまま用いて解析を行った。産業用ロボットの手先や関節にマーカをつけたり、複雑な背景画像からロボットを正確に抽出したりすることなく、異常動作検出が行えることを示した。さらに、パラメトリック固有空間法による動作解析において黄金分割法を適用することで、極めて短い時間での速度解析、異常動作検出を実現することもできた。これらのことから、高齢者、産業用ロボットを含め、様々な対象に広く利用できる異常検出手法の一つとして見通しを立てることができた。

6. まとめ

本論文では、工場で使われる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

システムを実現するという新しい試みについて、その検出方法の提案と実験による検証を行った。

現在の工場ラインで用いられている、サーボアンプやコントローラにおける異常検出システムでは検出できない異常動作もあり、ロボットの制御系とは全く独立した検出システムの必要性が認識されている中で、まさに「見た目」で異常を検出するモニタリングシステムは有効である。このようなモニタリングによる異常検出システムを併用することで、より信頼性の高いシステムが構築できると考えられる。

異常検出法として、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と、それを発展させたパラメトリック固有空間法を用い、異なる動き、速さなどの異常動作を検出する手法を提案した。さらに、固有空間上の軌跡どうしの比較における計算過程において黄金分割法を用いることにより、約 30ms という短い計算時間で速度異常を検出できることも示した。高齢者⁽⁵⁾や産業用ロボットのモニタリングのほかに、交通状況の監視や防犯カメラなど様々なモニタリングシステムに適用できる可能性が考えられる。

(平成 14 年 8 月 30 日受付, 同 15 年 2 月 3 日再受付)

文 献

- (1) M. Nagamachi: "Human error", *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 13, No. 5, pp.635-638 (1995) (in Japanese).
長町三生: "産業用ロボットとヒューマンエラー", 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 5, pp.635-638 (1995).
- (2) N. Sugimoto and H. Ikeda: "Safety and high reliable techniques for industrial robots", *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 14, No. 6, pp.788-791 (1996) (in Japanese).
杉本旭, 池田博康: "産業用ロボットの安全性と高信頼性技術", 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 6, pp.788-791 (1996).
- (3) 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).
- (4) Y. Mae, Y. Shirai, J. Miura and Y. Kuno: "Object tracking in cluttered background based on optical flow and edges", *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 15, No. 1, pp.103-108 (1997) (in Japanese).
前泰志, 白井良明, 三浦純, 久野義徳: "オプティカルフローとエッジを用いた複雑背景下での移動物体の追跡", 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 1, pp.103-108 (1997).
- (5) H. Seki and Y. Hori: "Detection of abnormal action using image sequence for monitoring system of aged people", *Trans. on IEE Japan*, Vol. 122-D, No. 2, pp.182-188 (2002) (in Japanese).
関弘和, 堀洋一: "高齢者モニタリングのためのカメラ画像を用いた異常動作検出", 電気学会論文誌 D, Vol. 122, No. 2, pp.182-188 (2002).
- (6) 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).
- (7) 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).
- (8) M. A. Turk and A. P. Pentland, "Face recognition using eigenspaces", *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.586-591 (1991).
- (9) T. Watanabe and M. Yachida, "Real Time Recognition and Gesture Degree Information Using Multi Input Image Sequences", *International Conference on Pattern Recognition*,

No. 2, pp.1855-1858 (1998).

- (10) T. Kaneko, T. Umeno and Y. Hori: "Motion control of multi-axis manipulator using robust servo system with two degrees of freedom", *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 9, No. 7, pp.830-840 (1991) (in Japanese).
金子智朗, 梅野孝治, 堀洋一: "2自由度ロボットサーボ系による多軸マニピュレータの運動制御", 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 7, pp.830-840 (1991).
- (11) 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳: "コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望", 新技術コミュニケーションズ (1998).

関 弘 和 (学生員) 1998 年大阪大学基礎工学部システム工学科卒業。2000 年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。2003 年同大学院博士課程修了。2003 年 4 月より千葉工業大学電気電子情報工学科助手。主として計測、制御工学に基づく高齢者支援、福祉制御工学に関する研究に従事。日本ロボット学会などの会員。

堀 洋 一 (正員) 1978 年東京大学工学部電気工学科卒業、1983 年同大学院博士課程修了。助手、講師、助教授を経て、2000 年 2 月より電気工学科教授。2002 年 10 月より東京大学生産技術研究所情報・システム部門教授。専門は制御工学とその産業応用、とくに、モーションコントロール、メカトロニクス、電気自動車などの分野への応用研究。最近福祉制御工学を開始。1993 年および 2001 年、IEEE Trans. on IE 最優秀論文賞、2000 年電気学会論文賞などを受賞。電気学会、計測自動制御学会、IEEE、日本ロボット学会、日本機械学会、自動車技術会、日本シミュレーション学会などの会員。