

画像処理技術の適用による原子力発電プラントの監視技術

Image Processing Technologies in Nuclear Power Plant Monitoring

久保 克己 兼本 茂 島田 英夫
K. Kubo S. Kanemoto H. Shimada

高い信頼性を要求される原子力発電所では、さまざまなプラント予防保全活動が行われている。なかでも、所員による巡回点検は、機器・配管などの異常を小さいうちに見つけて予防策をたてるうえで重要である。機器配管などの点検では、振動、温度、可視画像などの情報が主に使われるが、これらの情報を遠隔から計測し、さらに画像処理技術を適用した自動認識を行うことにより、点検の遠隔化と自動化が可能になる。

ここでは、巡回点検の自動化を旨とした事例として、プラント機器の三次元形状モデルと振動・温度画像を利用した画像認識技術、および環境変化により変動する画像データから蒸気漏れなどを検知する知的な画像認識技術の開発結果を述べる。

Various monitoring activities are carried out in nuclear power plants to ensure that the high reliability requirements of such plants are met. Inspection patrols by operators are important for detecting small anomalies in equipment. Vibration, temperature, and visual images are major forms of information used in equipment inspections. We are developing remote automatic inspection technologies comprising image sensing of equipment conditions and automatic recognition of the images.

This paper shows examples of image processing technologies, such as equipment monitoring using three-dimensional graphic plant models and vibration/temperature image data, and intelligent image recognition technology for detecting steam leakage.

1 まえがき

原子力発電プラントの信頼性のいっそうの向上のために、機器の多重化や品質向上に加えて、綿密な予防保全活動による不具合の未然防止が期待されている。なかでも、所員による機器・配管などの巡回点検（パトロール）は予防保全活動の一環として重要な役割を果たしている。このパトロールを実施する所員の作業負担は大きく、また、対象箇所によっては雰囲気線量が高くなったりするため、パトロールの自動化や遠隔化が望まれている。このためには、所員が現場に行き得る機器状態についての情報と同等のものを、遠隔からいかに計測するかという問題と、計測されたデータをどう認識するかという問題を解決する必要がある。機器状態の計測については、所員の巡視点検のかかなりの部分が目と耳に頼っていることから、工業用テレビ（ITV）映像と音響の計測が主要なものになるが、赤外線カメラで得られる温度分布画像や、スキャン式のレーザ振動計で得られる振動分布画像などを用いることにより、さらに正確な機器状態が把握できる。また、このような計測データをいかに認識するかは画像処理技術の積極的な適用が必要になる。

な画像認識技術の開発結果について述べる。

2 振動・温度画像を用いた機器状態の監視⁽¹⁾

2.1 概要

すでに述べたように、振動や温度の情報は、機器状態を詳細に把握するのに重要な情報である。最近では、赤外温度計やレーザドップラー振動計が小型化されてきており、簡便にこれらの情報を計測できるようになってきた。これらの計測器の特徴は、遠隔から非接触で機器の振動や温度状態を画像（二次元分布）としてとらえることができる点である。広域の状態の一括把握は、これまでの点計測に頼っていた機器状態の監視の機能を大きく高めることができ、故障の未然防止に寄与できると考えられる。しかし、このような計測画像を用いて機器状態の監視を行う場合、計測値がどの機器に対応するかを認識することが必要になる。特に、非定型の点検作業では計測位置が変化し、得られた計測画像の形が変化するため機器の認識は難しくなる。そこで、このような計測画像データと機器の対応付け、および、計測位置の変動に対する位置合わせを可能とするため、三次元形状モデルと計測画像との自動合成による機器状態の認識技術を開発した。

2.2 三次元形状モデルとの重ね合せによる認識

従来は、計測画像データにより機器の異常診断をするときには、計測器と同一の位置・方向で観測した可視画像と対応づけしていた。しかし、この方法では計測位置が変動した場合に対応することができず、計測点は限られてしまう。

したがって、ここでは任意計測点からの計測画像と点検対象機器との対応づけをするため、この機器の計測画像を機器の三次元の形状モデルと重ね合わせて表示し、この計測画像テクスチャを三次元形状モデルにマッピング表示する機能を開発した。

図1にその機能の概略の処理の流れを示す。

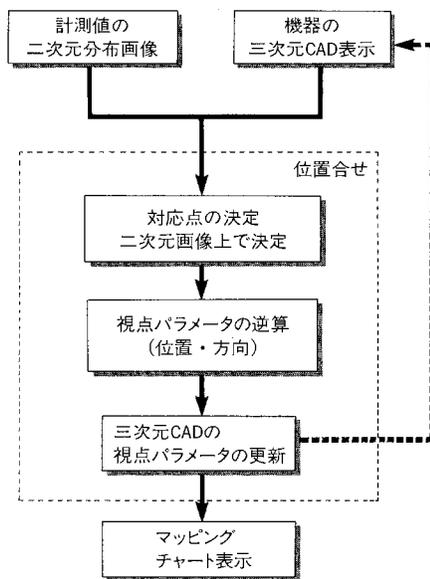


図1. 位置合せマッピング処理の流れ 計測値の二次元分布画像と機器の三次元CAD表示の対応点を決め、視点パラメータを逆算して位置合せする。

Flowchart of registration and texture mapping process

この機能により、画像計測データを対象機器に対応づけて異常箇所を特定できるほか、計測値の視認性向上にも大きく役だつ。さらに、振動や温度などの複数の画像計測データを対応づけることにより、機器の状態を総合的にみた異常判断が可能になる。

しかし、ここで問題となるのは三次元形状モデルの表示上の視点と実際の画像計測の視点とを位置合せする部分である。異なる種類の画像を位置合せすることと、三次元空間での位置合せをするという問題を現実的に解決するため、われわれは以下のような手法を開発した。

- (1) 視点位置合せ手法 視点位置合せは、計測画像と機器の三次元形状モデルにより表示した画像の対応点を複数点決定し、これらが一致するように視点パラメータすなわち視点の位置と方向を逆算して行う。そして更新された視点パラメータを用いて三次元形状モデルを再表示

し、この位置合せのループを繰り返して精度を高めていく。

三次元形状モデルの再表示を繰り返して視点パラメータを探索するのが単純な位置合せ方法であるが、この方法は三次元形状モデルの表示回数が多く計算時間がかかる。これに対して、この手法では二次元画像として計測値の分布と三次元形状モデルの表示画像の対応点を決定したうえで、対応点だけが一致するように非線形最小二乗法による繰返し計算を行っているため、三次元形状モデル表示回数が少なくでき、位置合せの計算の効率を大きく改善できる。ここで、対応点の認識は、計測画像と機器の三次元形状モデル画像の部分テンプレートのマッピングにより自動化している。部分テンプレートとは三次元モデルの全体表示画面の中の特定の弁や配管の形状に注目し、それをパターンとして抜きだしたものである。この部分テンプレートと計測画像の類似度を最大にする二次元画面上の対応点として求めている。

- (2) テクスチャマッピング 三次元形状モデル内の個別の機器形状と計測画像を対応づけるため、計測画像のテクスチャを三次元モデルの表面にはりつける。この処理は次のようにして行う。

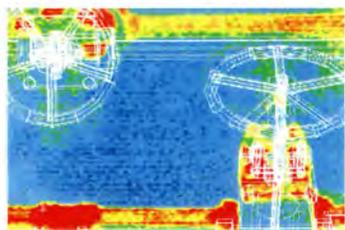
はじめに三次元ソリッドモデルで表示される各部分の単位画面が表示スクリーン上で占める領域を求め、その領域に対応する計測画像テクスチャを元のソリッドモデルの面に拡大・縮小してはり付ける。これにより、表示の視点から見えるすべての範囲の面に計測画像テクスチャをはり合わせた三次元モデルができあがり、任意の角度からこれを見ることができる。

2.3 有効性評価

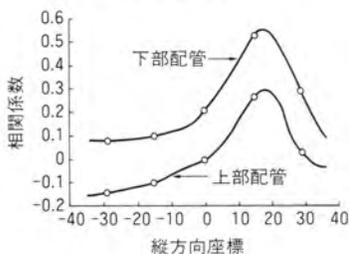
これらの機能の評価を実際の振動分布および温度分布の計測データを用いて行った。

2.3.1 位置合せによる対象機器認識 図2(a)は、赤外線カメラで計測した配管・バルブの温度分布の画像と三次元形状モデルを重ね合わせて表示したもので、位置合せ前の状態を示している。温度分布は、赤が温度が高く青が低いことを表している。三次元モデルを上下に2分割しそれぞれのテンプレートの計測画像との相関係数が最大となるようテンプレートの移動量を探索した。これにより対応点を決定して視点を逆算し再表示した結果を図2(c)に示すが、温度分布と三次元モデルはよく一致している。

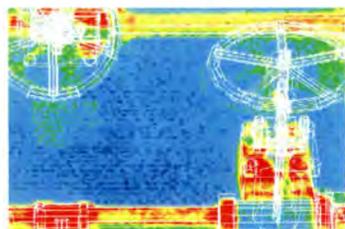
2.3.2 マッピング表示 配管の振動分布と温度分布を、それぞれ三次元モデルにマッピング表示した結果を図3に示す。これにより点検対象機器についてだけの計測値データを取り出すことができる。また、図3に示すように二次元の振動分布マッピング結果を用いて配管の軸方向にチャート表示することにより、振動モードを表示することができる。また、対象機器の注目すべき部分の温度や振動を同時に把握するこ



(a)位置合せ前



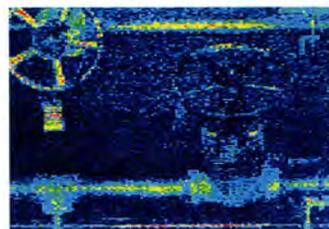
(b)配管温度分布



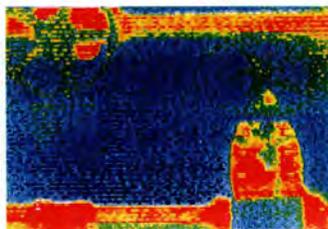
(c)位置合せ後

図2. 温度分布画像と三次元 CAD の位置合せ
テンプレートを分割して相関係数が最大となるように対応点を決定し、視点を逆算することにより位置合せした。

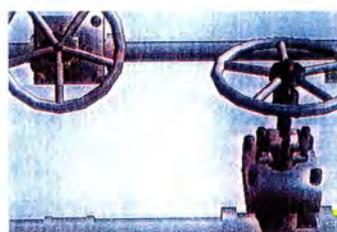
Registration of temperature distribution image and 3D CAD image



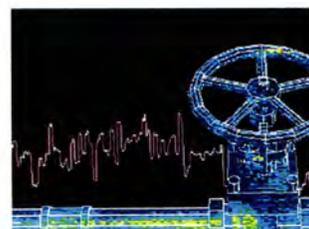
振動分布画像



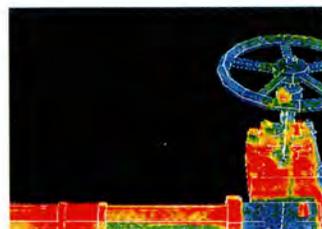
温度分布画像



3D-CAD



振動分布マッピング結果



温度分布マッピング結果

図3. 振動分布および温度分布の三次元 CAD へのマッピング結果
振動分布および温度分布の三次元 CAD へのマッピング結果から、機器の対応する点の状態を把握することができる。

Texture mapping of vibration and temperature distribution for 3D CAD

とができるため、これらを組み合わせた総合的な監視ができると考える。このような対応づけができれば、例えば、機器の振動状態の傾向監視の定量化や、複数画面のつなぎ合せによる配管などの長尺物の振動モードの把握、赤外放射率などを用いた計測データの補正などの多くの付加価値をもたせることができる。

3 可視画像による異常監視手法⁽²⁾

3.1 画像処理手順の自動生成による監視

プラントにおける現場監視項目について画像の特徴を分類すると、次のようなものが挙げられる。

- (1) 機器の外観異常や破損に見られる経時的な形状変化
- (2) 温度計や油面計の内容物の境界に見られる対象部位の濃淡変化
- (3) 塗装色の変色やランプの点灯異常などの経時的な色変化
- (4) 蒸気漏れなどの時系列画像の輝度変化
- (5) 照明装置の異常などの画像の濃淡のばらつき

このような特徴の識別を柔軟に行うために、強調処理、抽出処理、計測処理などいくつかの項目に分類した画像処理オブジェクト群を用意し、特徴検出のために必要な画像処理コマンドをオブジェクト群から自動的に選択して編集する。

図4は、強調処理における細分化および画像処理オブジェクト群を表したもので、注目する特徴が点か、線か、あるいは領域かによって局所差分処理、微分処理、線形変換処理などの画像処理オブジェクト群を選定する。

このようなアルゴリズムの適用例として、日照や照明の変化による点検対象物の時系列的な輝度変化の下での対象物の認識事例に、輝度状態が変動する点検計器（円形メータ）についての自動生成処理の実行と指針値の計測結果がある。図5は油温度計の処理結果であるが、この処理方法により、日照変化にかかわらず安定して結果を得ることができた。



図4. 画像処理オブジェクト群の例
注目する特徴が点か、線か、面かによって画像処理オブジェクト群を選定する。

Example of object group for image processing



図5. アナログ計器の読み取り例 このアルゴリズムにより、日照変化にかかわらず安定して油温度計の指針値を計測することができた。

Example of reading for analog meter indication

3.2 時系列画像差分法における外乱除去

従来は、画像中の時系列的な変化事象を抽出する手法として、時系列画像差分法が広く用いられている。時系列画像差分法とは、ある時間間隔で取り込んだ画像間の輝度差分を蓄積し、蓄積された差分値および差分領域によって時系列的な変化を判定する処理手法である。従来方法による処理結果を図6(a)に示す。この図からもわかるように、蒸気漏れのような異常事象だけでなく、発電所内には必須(す)の表示札も異常事象として抽出してしまう問題点があった。このように画像の差分の蓄積だけを情報とし、監視領域および監視対象物の異常を判断するのは誤認識の原因となるものである。

この問題を解決するために、移動ベクトル法を用いて物体の動きを計測し、表示札のように周期的な動きをする対象物の異常事象を区別する方法を考案した。

まず、監視領域の映像を1/30秒ごとに画像化し、時間的に前後の画像を用いて差分処理画像を作成する。この画像を固定サイズの領域に分割し、各領域の平均輝度値で領域を埋める。そして、この各領域の輝度値を時系列的に整列させた画像を作成する。次に、この整列した画像を測定したい周期の



図6. 移動ベクトル法によるノイズ除去と蒸気漏れの検出結果 差分処理だけでは表示札のような正常変化も検出してしまう(a)が、移動ベクトル法によれば異常事象だけ識別できる(b)。

Noise removal by moving vector method and result of steam leak detection

間で画像変換を行うことにより時間的変動を示す時系列データを得る。このとき、表示札のような画像は周期的に変動し、蒸気漏れのような画像はランダムに変動するという特徴を利用して、実際の異常事象を区別して認識できるようになる。

図6(b)は、実際のプラントを背景に模擬蒸気と表示札を映し、時系列画像差分法に移動ベクトル法を適用して処理を行った結果で、上述の方法により周期性領域を削除した画像である。移動ベクトル法によると、表示札部分は分割領域の最大振幅値が大きく、模擬蒸気および背景部分は分割領域の最大振幅値が小さくなる。最大振幅値が大きい分割領域を時系列画像差分法の処理結果から除去することで、正常な変化事象と異常事象との識別が可能であることがわかる。

4 あとがき

原子力発電プラントの現場機器の監視を遠隔から行うための画像処理技術を紹介した。人間にとっては簡単な映像の認識作業を機械に行わせるのはやさしいことではない。しかし、画像処理技術や三次元のコンピュータグラフィックス技術が手軽に使える時代になっており、ここで述べたような認識技術がコスト効果比を考慮して実用に近い段階まできている。このような認識技術は、単に人間の作業を置き換えるというだけではなく、人間より優れた監視ができることもあるという点にも着目する必要がある。今後、原子力発電所のいっそうの信頼性向上や機器の予防保全に役だてたいと考えている。

文 献

- (1) S. Kanemoto, et al; Application of Automatic Mobile Patrol System for Nuclear Power Plant, AIR'94, Mito, 1994
- (2) 小久保 隆, 他: 火力プラントにおける視聴覚センサを用いた異常検知手法に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1995年6月



久保 克己 Katsumi Kubo

1968年入社。原子力発電所の監視システムの開発に従事。現在、原子力技術研究所電子応用システム部主査。Nuclear Engineering Lab.



兼本 茂 Shigeru Kanemoto, D.Eng.

1976年入社。原子力発電所の監視システムの開発・研究に従事。現在、原子力技術研究所電子応用システム部主査、工博。Nuclear Engineering Lab.



島田 英夫 Hideo Shimada

1972年入社。原子力発電所の自動機器の開発設計に従事。現在、原子力事業部原子力第一システム設計部主幹。Nuclear Energy Div.