

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560826

研究課題名（和文）時系列解析法を用いた原子力プラント状態基準保全技術の信頼性向上と医療応用に関する研究

研究課題名（英文）Study about Improvement of Reliability on Maintenance Technology Based on NPP Condition and Medical Application Using Time Series Analysis

研究代表者

出町 和之（DEMACHI KAZUYUKI）

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：00292764

研究成果の概要（和文）：

動的回転機器のリアルタイム異常診断&予測システムに関する研究では、SST（Singular Spectrum Transform）法を用いることにより、従来の他の手法に比べて簡便かつ早期な異常検出法の開発を行った。腫瘍認識システムの構築では、PCA（Principle Component Analysis）および SSA（Singular Spectrum Analysis）を組み合わせることにより、医療用 X 線透過動画の近未来予測法を開発した。さらに肺腫瘍挙動の未来予測システムの開発では、XYZ ステージと CCD カメラによる装置を製作し、模擬腫瘍の動きを 95% の成功率で誤差 1mm 以内で予測することに成功した。

研究成果の概要（英文）：The simpler and earlier abnormality detection system was developed by applying the SST (Singular Spectrum Transform) for the Real-time diagnosis and prediction of active equipment. The movie-prediction method was developed to predict the near future of the medical X-ray movie by applying the PCA (Principle Component Analysis) and SSA (Singular Spectrum Analysis). The imitation tumor was moved with the XYZ-stage and its motion captured with the CCD cameras was successfully predicted by SSA method with the 1mm accuracy of 95% reliability.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：主成分分析、信号解析、予測、放射線治療、状態監視保全

1. 研究開始当初の背景

近年、原子力プラントに対する安全性向上の必要性がますます強く要求され始めている。原子力産業界では今まさに新しい保全方式を採用し今まで以上に高い原子力安全性を実践しようとしているが、諸外国に比べ状態基準保全（CBM：Condition Based

Maintenance）の適用・活用は遅れている。状態監視技術が安全性の担保に中核的な役割を果たせることを実感するには、状態監視技術に対する信頼性をこれまで以上に向上させる必要がある。

他方、肺がんは呼吸や蠕動に伴う内臓の動きにより数センチも移動することが分かっ

ている。これに対し近年、固定された放射線ビームを用いた「迎撃」型の動態追跡放射線治療装置(RTRT)が開発され成果を上げている。さらに今後は、観察された腫瘍をリアルタイムで追尾しながら連続的にX線を照射する「追尾」型のRTRT開発が望まれている。しかし、ガンの位置を観測してから照射ガントリの向きを変えるまでには数秒の時間遅れが生じるため、その時間遅れを相殺するために、数秒程度まで腫瘍動態の未来予測を行う必要がある。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では以下の3つを研究の目的とした。

- ① 状態監視センサなどによって測定される時系列データに主成分分析を適用し、異常状態の発生検知技術を確立する。
- ② 放射線治療装置 kV カメラ(X線)による腫瘍の2次元的動態データからの腫瘍認識システムの構築
- ③ 肺腫瘍動態予測に CCD カメラと XYZ ステージを組み合わせた装置の開発と予測した腫瘍位置にリアルタイムで治療ビームを移動させるための実証。

3. 研究の方法

① 異常状態の発生検知技術の開発

異常状態を含む時系列データの取得には、正常呼吸を数回繰り返した後に咳・くしゃみ等を行った場合の胸部体表面の挙動をレーザー変位計にて測定した。図1の緑線が取得した呼吸時胸部挙動である。65秒付近から咳により胸部の動きが急激に変化していることが分かる。本研究ではこの異常挙動を、胸部の動きが通常呼吸時の振幅を超えるよりも前に検知する手法の開発を行った。適用した手法はSST(Singular Spectrum Transform)である。

SST法ではまず、L次元Nステップ分の時系列データから埋め込み次元と呼ばれるパラメータMを用いて自己相関行列(LM行LM列)を作成する。その自己相関行列の固有値の内、大きいものからr個に対応する固有ベクトルを求め、行列E(LM行r列)とする。ここである時間ステップ $t = t_1$ での固有ベクトルを E_j^1 とする。jは $1 \leq j \leq r$ である。次に一定時間後の $t = t_2 > t_1$ において、固有ベクトルのうち最も固有値の大きいものに対応する固有ベクトルを E_j^2 とすれば、この $t = t_2$ が変化点であるかどうかを判断するための変化度スコアzが式(1)で表される。

$$z \equiv 1 - \sum_{j=1}^r (E_j^2)^T E_j^1 \quad (1)$$

変化度スコアが大きい時、時間ステップ t_2 は挙動変化の可能性が高い点として考えられる。

さらに、MSSA法(Multi-channel Singular Spectrum Analysis)という手法を用いて、時系列データの予測手法も開発した。i行 $M \times (L-1) + 1$ 列目の要素が1、他の全ての要素が0である行列R

(LM行L列)と、既知のデータN-1個だけを抜き出し、未知のデータを0としたQ(LM行1列)を利用して、N+1ステップ目の未来のデータPを式(2)のように求めることができる。

$$P = (I - R^T E E^T R) R^T E E^T Q \quad (2)$$

ことができる。

② 肺腫瘍X線動画からの呼吸時腫瘍動態予測システムの開発

肺がん患者の放射線治療の前には、必ずX線透過画像を取得することによる診断を行う。本研究ではその診断X線画像を用い、肺腫瘍の呼吸時における移動・変形を予測した画像を作成する手法の開発を行った。まず、動画を構成する複数の静止画に対し、主成分分析(PCA:

Principal Component Analysis 4))を行って主成分画像を抽出した。その導出を次に示す。まず、画像をピクセル値の入った行列と見なし、その行列を1次元ベクトルに変換する。予測に使われる画像数をNとすれば、その導出を次に示す。

まず、画像をピクセル値の入った行列と見なし、その行列を1次元ベクトルに変換する。予測に使われる画像数をNとすれば、そのベクトルは $X_i (1 \leq i \leq N)$ と表される。それらを横に並べた行列をYとし、YとYの転置行列を掛け合わせた行列をZとする。そのZの固有値の内、大きいものからr個に対応する固有ベクトルを求め、行列 $V=(V_1, V_2, V_3, \dots, V_r)$ とする。この行列Vの各列 $V_1, V_2, V_3, \dots, V_r$ はこの手法で入力された画像群の主要な構成要素であるため、これらを使い再構成を行う手法が主成分分析と呼ばれるものである。

この主成分画像を使って動画の未来予測を行うには、まず、Yの転置行列とVを掛け合わせることによって、それぞれの時間ステップにおけるVに掛かる係数

$a_{i,1 \sim N}$ を求める。これを i ごとに時系列データとして再構成し、さらに前述の MSSA 法を適用することで、係数 $a_i(t)$ の未来変化を予測できる。その未来の $a_i(t)$ と $V_1, V_2, V_3, \dots, V_r$ との線形和を取ることによって、未来の画像ベクトル $X(t)$ を予測することができる。

$$X(t) = \sum a_i(t)V_i \quad (3)$$

つまりこの研究では、PCA によって動画の主要な構成画像 (V_i) を抽出し、それに掛け合わされる係数を MSSA 法によって予測した後、予測された未来の係数と主要な構成画像を利用し画像を再構成することによって、未来の画像を予測する手法を提案した。

- ③ 肺腫瘍動態予測に CCD カメラと XYZ ステージを組み合わせた装置の開発と予測手法の開発

図 1 に、XYZ ステージと模擬腫瘍(白球)、2 台の CCD カメラを組み合わせた腫瘍動態予測システムを示す。肺腫瘍の動きを XYZ ステージで模擬させた白色球の位置を 2 台の CCD カメラで測定し、予測プロセスに渡す。予測プロセスは位置データを用いて、予測値を治療装置に送信する。治療装置は予測値に照射できる位置へ移動するというものである。予測には前述の MSSA 法を適用した。

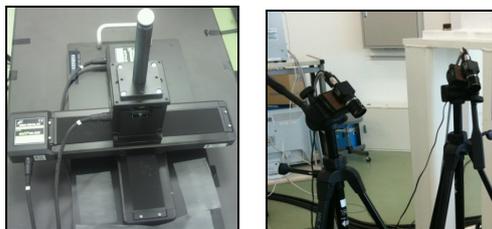


図 1: XYZ ステージと模擬腫瘍(白球)、2 台の CCD カメラを組み合わせた腫瘍動態予測システム

4. 研究成果

- ① 異常状態の発生検知技術の開発

図 2 の赤点青の線が予測値、赤丸が SST の停止信号が発せられた時間ステップである。この胸部挙動データでは、66 ~ 67 秒付近からくしゃみが始まるデータであるが、65 秒付近で SST の信号が発せられ、1,2 秒前に異常挙動が予測された。

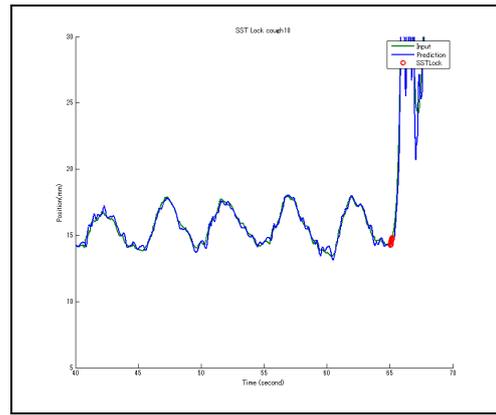


図 2 : 呼吸異常の検知 (咳の場合)

- ② 肺腫瘍 X 線動画からの呼吸時腫瘍動態予測システムの開発

ここでは、肺腫瘍患者の肺の透視画像 (図 3) を対象に動画の予測を行った。図 3 では、左上から右下にかけて時間ステップが進行しており、呼吸によって肺の形状等が変化している。

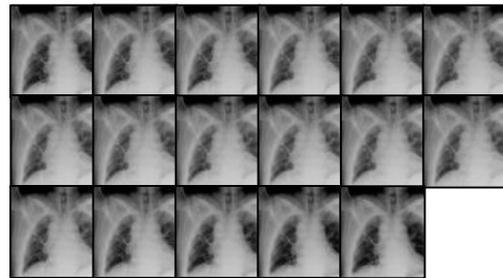


図 3 肺の時系列透視画像データ

図 4 は図 3 の動画 (画像群) の未来の予測結果の一部を示す。実際の動画予測では、これらの画像を予測するだけでなく、任意の枚数の画像・動画を予測することが可能である。図 3 の上左図が 1 ステップ目の元画像、上中央図が予測画像、上右図が予測値と元画像との差、下段はそれぞれ 9 ステップ目の元画像、予測画像、差となっている。予測画像と元画像との間に誤差が少ないことが分かる。また、定量的に画像の一致度を測るため、式 (4) を利用した。

$$Z = \frac{\sum_{xy} [f(x,y) - \bar{f}] [t(x,y) - \bar{t}]}{\sqrt{\sum_{xy} [f(x,y) - \bar{f}]^2 \sum_{xy} [t(x,y) - \bar{t}]^2}} \quad (4)$$

式 (4) は正規化相互相関と呼ばれ、2 枚の画像の一致度を測る指標の 1 つで 1 に近ければ 2 枚の画像が一致している。結果

としては、予測画像と元画像の値が 1 ステップ目の画像では、0.9999594 で、9 ステップ目の画像が 0.998667 と一致に近い値であった。

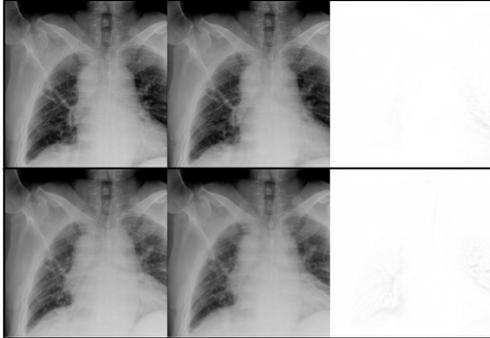


図4 動画予測の結果

また、動画予測と SST を組み合わせた動画の異常検知では、図2の画像を並び替えて人為的に異常が存在する動画を作成し実験を行った結果、異常の時間ステップにおいて、その異常を捉えることに成功した。

③ 肺腫瘍動態予測に CCD カメラと XYZ ステージを組み合わせた装置の開発と予測手法の開発

腫瘍データの一例を図5に示す。青の線が L-R 方向（左右方向）、緑の線が S-I 方向（上下方向）、赤の線が A-P 方向（前後方向）となる。

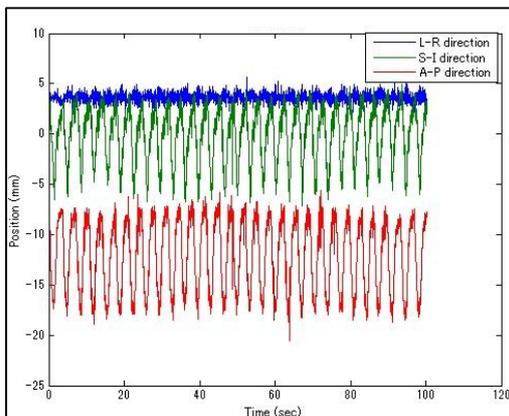


図5 肺腫瘍挙動データ（患者データ 009）

予測する時間ステップ（機器で発生する時間遅れ）を 200 ミリ秒と仮定し、左上葉腫瘍の頭尾方向挙動データの予測結果を図6に示す。緑の線が入力した患者データ、青の線がある程度ノイズ除去を行った再構成値、赤の線が予測値を表す。なお、実際のデータと予測値との誤差の平均値は 1.17mm、ノイズ除去

後のデータと予測値との誤差の平均値は 0.52mm であった。

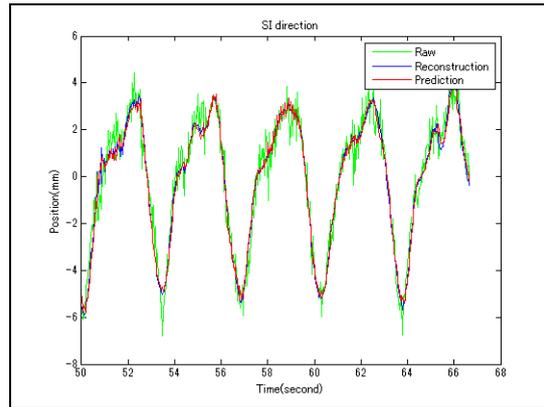


図6 肺腫瘍挙動の予測結果（頭尾方向）

また、全 20 種類の肺腫瘍データについて予測を行った結果を図7に示す。青のグラフが予測値と生データとの誤差の平均値、赤のグラフが予測値とノイズ除去後のデータとの誤差の平均値である。それぞれ、大きく誤差があるものを除いて、ノイズ除去後のデータとの誤差の平均値は 1mm を下回る予測結果となった。

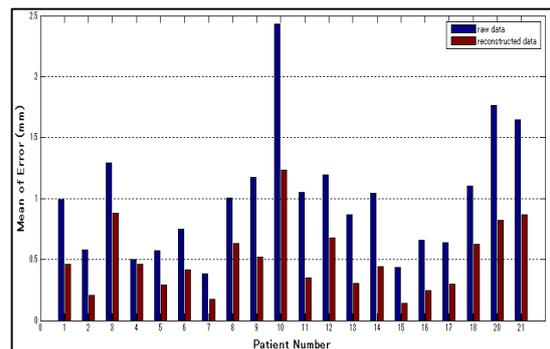


図7 様々な肺腫瘍予測結果

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

① Ritu Bhusal Chhatkuli, Kazuyuki Demachi, Masaki Kawai, Hiroshi Sakakibara, Kazuma Kamiaka and Mitsuru Uesaka

“An approach for Motion Image Prediction and Reconstruction using Principal Component Analysis,” In Proceedings of 1st International Conference on Maintenance Science and Technology for Nuclear Power Plants

Proc. of 1st International Conference on Maintenance Science and Technology for Nuclear Power Plants

査読有、1 巻、2012、103-104

②Kazuyuki Demachi, Hiroshi Sakakibara, Kazuma Kamiaka, Ritu Bhusal Chhatkuli and Masaki Kawai

Movie Prediction Technique based on the PCA and SSA Methods

Proc. of 1st International Conference on Maintenance Science and Technology for Nuclear Power Plants

査読有、1巻、2012、169-170

③Hiroshi Sakakibara, Kazuyuki Demachi, Masaki Kawai, Ritu Bhusal Chhatkuli, Kazuma Kamiaka and Naoto Kasahara

Development of Anomalous Detection using Movie Prediction

Proc. of 1st International Conference on Maintenance Science and Technology for Nuclear Power Plants

査読有、1巻、2012、173-174

〔学会発表〕(計9件)

①河合理城, 出町和之, 水口明, 石川正純, 白土博樹, 上坂充

M-SSA法を用いた腫瘍の挙動予測

第101回日本医学物理学会学術大会

2011年4/7~4/10

パシフィコ横浜

②Masaki Kawai, Kazuyuki Demachi, Hiroki Shirato, Masayori Ishikawa and Mitsuru Uesaka

Development of Prediction System for Moving Tumor by MSSA for Chasing Radiotherapy

6th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, 11th Asia-Oceania Congress of Medical Physics

2011年9/29~10/1

九州大学

③河合理城, 出町和之, 石川正純, 白土博樹, 上坂充

MSSA法を用いた腫瘍動体予測システムの開発

日本機械学会 2012年度年次大会

2012年9/9~9/12

金沢大学

④河合理城, 出町和之, 石川正純, 白土博樹, 上坂充

充追尾型放射線治療のための腫瘍挙動予測システムの開発

2013年電子情報通信学会 総合大会 2013年3月19~22日

岐阜大学

⑤Ritu Bhusal Chhatkuli, Kazuyuki Demachi, Masaki Kawai, Hiroshi Sakakibara and Mitsuru Uesaka

Development of motion image prediction method using principal component analysis

日本保全学会 第9回学術講演会

⑥Bhusal Chhatkuli, Kazuyuki Demachi, Masaki Kawai, Hiroshi Sakakibara and Mitsuru Uesaka

Movie prediction of lung tumor for precise chasing radiation therapy

第104回日本医学物理学会学術大会

2012年9/13~9/15日

つくば国際会議場

⑦Ritu Bhusal Chhatkuli, Kazuyuki Demachi, Masaki Kawai, Hiroshi Sakakibara, Kazuma Kamiaka and Mitsuru Uesaka

An approach for Motion Image Prediction and Reconstruction using Principal Component Analysis," In Proceedings of 1st International Conference on Maintenance Science and Technology for Nuclear Power Plants

1st International Conference on Maintenance Science and Technology for Nuclear Power Plants

2012年11/11~11/14

University of Tokyo

⑧Kazuyuki Demachi, Hiroshi Sakakibara, Kazuma Kamiaka, Ritu Bhusal Chhatkuli and Masaki Kawai

Movie Prediction Technique based on the PCA and SSA Methods

1st International Conference on Maintenance Science and Technology for Nuclear Power Plants

2012年11/11~11/14

University of Tokyo

⑨Hiroshi Sakakibara, Kazuyuki Demachi, Masaki Kawai, Ritu Bhusal Chhatkuli, Kazuma Kamiaka and Naoto Kasahara

Development of Anomalous Detection using Movie Prediction

1st International Conference on Maintenance Science and Technology for Nuclear Power Plants

2012年11/11~11/14

University of Tokyo

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.n.t.u-tokyo.ac.jp/demachi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

出町 和之 (KAZUYUKI DEMACHI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：00292764

(2) 研究分担者

芳賀 昭弘 (AKIHIRO HAGA)

東京大学・大学院医学系研究科・特任助教

研究者番号：30448021