

パラメトリック固有空間法による医用3次元画像の位置合わせ

澤田 匡秀[†] 目加田 慶人[†] 鳥脇 純一郎[†] 平澤 宏祐[‡] 鷺見 和彦[‡] 村瀬 洋^{††}

[†]中京大学大学院情報科学研究科 〒470-0393 愛知県豊田市貝津町床立 101

[‡]三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1

^{††}名古屋大学大学院情報科学研究科 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

E-mail: h10908m@st.chukyo-u.ac.jp, {y-mekada, jtoriwak}@sist.chukyo-u.ac.jp, murase@is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 近年 X 線 CT 装置の発展により、得られる医用 3 次元画像量が膨大なものとなっている。医師の診断に対する負荷が問題となっている。経時画像の位置合わせは診断や治療計画における基本的な手技であるため、臨床の場においてこの作業の負担軽減は非常に重要な課題となる。そこで本稿ではパラメトリック固有空間法を用いて問題の解決を図った。この手法は、画像全体の位置合わせではなく、予め位置を合わせたい部位が決まっている場合にその濃淡情報を低次元の固有空間に投影し、画像間の対応付けを行うものである。本手法は被験者の撮影の際に起こりうる剛体変形として、3 自由度を考慮したものである。実験では同一被験者のそれぞれ撮影時期の異なる 4 つの画像を用いた。正規化相互相関を用いた手法と比較して、同等の精度で 1 秒以下という高速な位置合わせを実現した。

キーワード 固有空間法, 剛体位置合わせ, 3 次元医用画像

Rigid registration of 3D medical images by the Parametric Eigenspace method

Masahide SAWADA[†] Yoshito MEKADA[†] Junichiro TORIWAKI[†] Kousuke HIRASAWA[‡]
Kazuhiko SUMI[‡] Hiroshi MURASE^{††}

[†]Graduate School of Information Science, Chukyo University, 101, Tokodachi, Kaizu, Toyota, 470-0393 Japan

[‡]Mitsubishi Electric Corporation, 8-1-1, Tsukaguchi-honmachi Amagasaki, 661-8661 Japan

^{††}Graduate School of Information Science, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa, Nagoya, 464-8601 Japan

E-mail: h10908m@st.chukyo-u.ac.jp, {y-mekada, jtoriwak}@sist.chykyo-u.ac.jp, murase@is.nagoya-u.ac.jp

Abstract Recent progress in computed tomography (CT) imaging devices generates a huge number of high-resolution slice images of a patient. Diagnosing these slice images is a heavy burden on medical doctors. Three dimensional medical image registration is a fundamental technique which applied various medical treatment such as image diagnosis, treatment planning, image guided surgery, etc. In this paper, we propose a quick registration method using parametric eigenspace method. The proposed rigid registration method takes into account the three degrees of freedom. The experiments using four CT images of the same patient taken for one year, it is found that alignment accuracy is almost the same as the method using normalized cross correlation, and computation time is less than one second.

Keyword Eigenspace method, Three dimensional medical images, Rigid image registration

1. はじめに

近年 X 線 CT 装置の高精度化が著しく進んでいる。患者一人当たりから得られる画像枚数が非常に膨大なものとなっている。医用画像の診断においては、単独の画像を対象としたものに加え、過去の画像との比較に基づくものが重要な位置を占めている。例えば、過去画像と現在画像の対応する位置を求め、そこでの濃度変化に基づき病態の進み具合を評価するなどである。そこで求めら

れる技術は、複数の画像の対応する位置を求める事である(画像レジストレーション)。特に X 線 CT 装置などで撮影される人体の断面の組で表された 3 次元画像の位置合わせを手で行う場合、3 次元すべての情報を一度に見ることができないため、複数の断面像や投影像を見ながら対話的に操作しなければならず、医師にとっては多大な負荷となっている。

これらの問題を解決するために従来は正規化相互相関[1]等が提案されているが、この手法は位置合わせの精度

は正確であるものの、多くの計算時間を要してしまうと言う問題がある。また、同種の画像間のみならず、CTとMRI、PETとCTなどモダリティの異なる画像や同種のモダリティでも条件の異なる画像を対象に、幅広く研究が進められている[2-4]。画像間類似度としては、同一モダリティで撮影状況が同じ場合には正規化相互相関、異モダリティ画像や同一モダリティであっても造影撮影を対象にする場合は正規化相互情報量などが使われることが多い。さらに、画像間の撮影時間の違いにより生じる対象の位置ずれや臓器変形の考慮など、様々な検討がなされてきている。

これらの多くは、対象の非剛体変形に対応するために画像に非剛体変形を加えるなど、類似度を計測する部分領域の設定などに工夫がされているため、うまく位置合わせが実現できたときの精度は高いものの、高次元の医用データをそのまま使った対応付けとなる粒子線治療のように、治療計画が付随した画像の患部周辺の局所的な部分を対象とし、現在の画像との位置合わせを行う場合は、短時間で位置合わせ作業を行うことは、検査の精度とスループットの工場のために必要不可欠である。この場合には、人手で修正可能な数mm程度の誤差は許容し、高速な位置合わせを望む声がある。

本稿では、平行移動と回転に対応した剛体レジストレーションの高速化のために、パラメトリック固有空間法を応用した位置合わせについて提案する。

2. パラメトリック固有空間法[5-7]

パラメトリック固有空間法とは、少ない記憶容量で3次元物体を2次元画像の集合体として記述することで、2次元画像例から物体を容易に学習し、3次元物体を2次元照合により認識することを目的として村瀬らにより提案された手法である[8]。これは、学習段階と認識段階の2つの段階で構成されている。学習画像の固有ベクトルを各軸とした多次元で表現された固有空間に各スライスを投影し、スライスの連続する変化を多様体として表現する。この多様体と入力画像の多様体との距離により、画像間のマッチングを行う手法である。多様体の表現例を図1に示す。

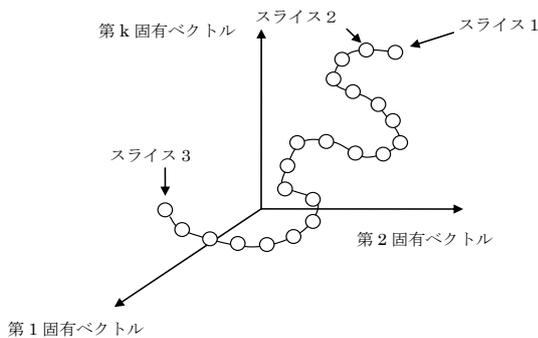


図1. 多様体の表現例

2.1 学習段階(固有空間生成)

まず、学習画像各スライスに対し、その画素値を特徴量とした特徴ベクトル \hat{x} を $x = (\hat{x} - \bar{\hat{x}}) / \|\hat{x} - \bar{\hat{x}}\|$ によって大きさ1、平均0となるように正規化する。この各ベクトルを行、画像のスライス枚数を列とした行列 X を以下のように作成する。

$$X = (x_1, \dots, x_N) \quad (1)$$

ここで、 $n(=1, 2, \dots, N)$ はCT画像のスライス番号である。次に自己相関行列 XX^T により、各学習画像の固有値、固有ベクトルを求める。自己相関行列 XX^T の上位 K 個の固有値に対応する固有ベクトル $e_i (i=1, 2, \dots, K)$ を各軸とした多次元で表現される固有空間 (K 次元超球面) を生成する。以下の式を用いて各特徴ベクトル $x_{n,p}$ を固有空間上の点 $g_{n,p}$ に投影する(図1)。投影された点は K 次元超球面上に分布することとなる。

$$g_{n,p} = (e_1, e_2, \dots, e_K)^T x_{n,p} \quad (2)$$

ここで、 $p(p=1, \dots, P)$ は画像の平行移動と回転に関する剛体変形のパラメータであり、位置合わせを行う2画像間の人体全体の位置ずれに対応するために、 x_n に加えるものである。そして、学習画像の各スライスを連続する多次元曲線、点列 $g_{n,p}$ を繋ぎ合わせて多様体として表現し、これを固有空間内で1つの連続する画像として扱う。

2.2 入力段階(位置合わせ処理)

認識段階では先程処理を施した学習画像に対応付けを行う、入力画像に対して処理を施す段階となっている。認識段階においても位置合わせ対象の入力画像に対して、画素値を特徴量とした特徴ベクトル \hat{y} を

$$y = (\hat{y} - \bar{\hat{y}}) / \|\hat{y}\| \quad (3)$$

によって大きさ1、平均0となるように正規化する。次に、前節と同様に i 個のスライス画像の特徴ベクトル y_i を学習段階で生成した同じ固有空間上の点 z_i に以下の式を用いて投影する。

$$z_i = (e_1, e_2, \dots, e_K)^T y_i \quad (3)$$

z_i と $g_{n,p}$ の類似度を次のように定義する。

$$d_M^{(i)}(\theta) = z_i^T g_{n,p} \quad (4)$$

この式を用いてすべての点列 $g_{n,p}$ と点列 z_i の距離を求め、画像間対応付けを行う。図2に学習画像、入力画像の多様体の表現例を示す。

最後に多様体として表現された学習画像・入力画像の各投影点間の距離を求める。その投影点の距離が最小であれば、同一の画像であるとして結果出力を行う。

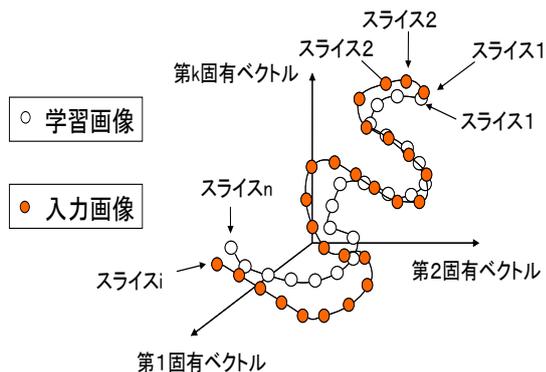


図2. 学習画像と入力画像の多様体表現例

3. 実験

本稿では同一被験者の、それぞれ撮影時期の異なる4つのX線CT画像を使用した。最初に撮影された画像がs5, s5から2ヵ月後に撮影された画像をs6, s5から5ヵ月後に撮影された画像をs7, 13ヵ月後に撮影された画像をs9と呼ぶ。各スライス断面のサイズは 512×512 画素, スライス枚数は193~209枚, スライス内画素サイズは0.469mm, 再構成間隔(断面間の距離)は1.25mmであった。

学習画像に対してスライス内解像度を5mm, 体軸方向の解像度が1mmとなるようにバイキュービック補間を行った画像を用いて固有空間を求めた。ただし, 剛体変形を加えた際に再構成された胸部以外の領域を参照しないように, マスク処理により画像中心部を抜き出し, これらを用いた。固有ベクトルの画像化例を図3に示す。ベクトル化する領域は各スライスの中心から半径100mmの円内の領域である。このとき特徴ベクトルの次元数は1245であった。固有空間の次元数は実験的に20とし, 固有値の大きい方から対応する20の固有ベクトルを選択した。これは, 元々 512×512 次元の画像間対応付け問題を20次元の特徴ベクトルを使って求めたことになる。

上記で求められた固有空間に対して, 様々な剛体変形を加えた画像を投影し, 学習軌跡とした。剛体変形のパラメータとしては, 原画像に対して, 平行移動を肩方向にそれぞれ0mm, ± 3 mm, ± 6 mm, ± 9 mm, 回転変形は背腹方向を回転軸にそれぞれ 0° , $\pm 2^\circ$, $\pm 4^\circ$ の組み合わせの35パターンを行った。対応付けの際の類似度としては, 位置合わせ目的スライスとその前後5mm, 10mm離れたスライスの固有空間内での対応点までの距離の総和とした。位置合わせを行いたい画像をこの固有空間に投影し, この距離が最小となる軌跡と対応スライスを求めることで, 剛体変形のパラメータとした。

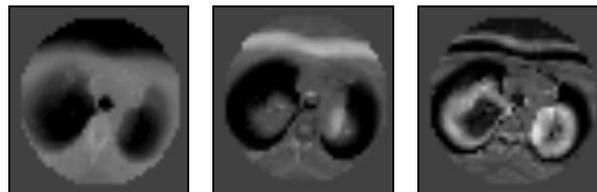


図3. 固有ベクトルの例. 固有ベクトルを0から255に正規化して表したものである。

4. 結果と考察

4.1 位置合わせ結果

図4にs5の128スライス目との位置合わせ結果を示す。チェスボード表示とは, 2画像を小ブロック単位で交互に配置したものである。ここでの画像の類似度評価は, 前節で述べた半径100mmの範囲である。体表面付近にみられる位置ずれは類似度評価の範囲外であり, 問題はない。目視で与えた対応スライスであるs6の131枚目が得られており, 望ましい結果であった。このときの剛体変形パラメータは平行移動6mmと回転0度であった。

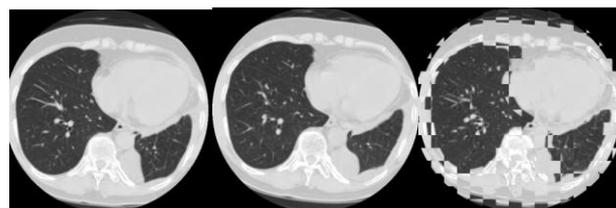


図4. 目視結果

図5にs5とs7の位置合わせ結果を示す。目視で定めた正解スライスである141枚目に対して, 3mm離れた138枚目が求められた。このときの剛体変形パラメータは, 平行移動9mmと回転2度であった。この被験者の場合, 治療の進行に合わせて左肺(画像中の右部分)に胸水(肺野内に溜まる液体)が増加しているため, 比較的大きめの回転角度となった。

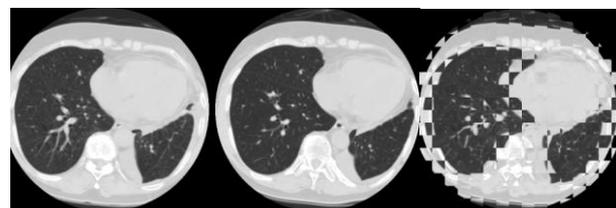


図5. 位置合わせ結果

図6にs5とs9の位置合わせ結果を示す。目視での正解である139枚目から12mm離れた147枚目が結果として得られた。このときの剛体変形パラメータは平行移動9mmと回転0度であった。1年以上経過する間に胸水が

増加し、画像全体の類似度では位置合わせが困難であった。

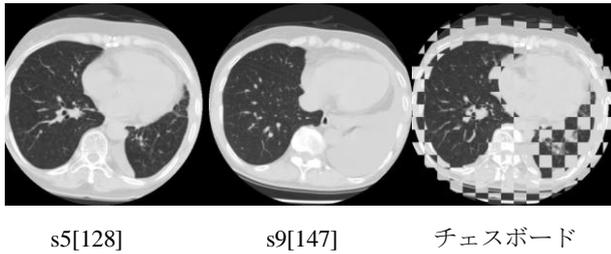


図 6. 目視結果

4.2 考察

実験結果より、撮影間隔が短く、画像間の変形が少ない場合には十分な位置合わせ精度が得られていることがわかった。今回用いたデータは 1 年にも及ぶ化学治療過程のものであったが、放射線治療などに使われる数日間隔で撮影される画像に適用することは十分に可能と考える。また、位置合わせに要した計算時間も、Pentium4, 3.4GHz, メモリ 4GB の計算機で平均 0.26 秒と非常に高速であり、精密な位置合わせを人手で行う際の初期値と考えれば、十分な結果であった。また実験的に、回転に関する変形がほとんどないことがわかったが、これは、幅の狭い寝台に仰臥するという X 線 CT 装置の撮影方法からも予想されたことであった。その結果、同じ方法で平行移動のみに対応した従来法と比較しても同等な結果となった。

5. むすび

本稿では、パラメトリック固有空間法による X 線 CT 画像の位置合わせを提案した。X 線 CT 画像は寝台に仰臥して撮影されるため、頭足方向と左右方向の平行移動と背腹方向の軸周りの回転という計 3 自由度の剛体変形に対応した位置合わせであった。人手による位置合わせ結果と比較した結果は、画像の極端な変形が無い場合は十分によい結果であった。本手法の最大の特徴である位置合わせ計算時間に関しても、従来通りの高速な計算が可能であることも確認された。

今後の課題として固有空間の次元数を変更することによる、結果の違いをより詳しく分析する。また、今回は学習画像の 128 枚目に対する位置合わせであったので、対象スライスを変更し、本手法の有効性を更に深く確認する。さらに、位置合わせ対象スライス付近のスライス数枚のみを用いた位置合わせについて検討してゆく。

謝 辞

日頃より熱心にご討論頂く、中京大学目加田研究室の諸氏に深く感謝する。本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金、厚生労働省がん研究助成金、三菱電機(株)先端技術総合研究所の援助による。

本研究では、画像処理にソフトウェアライブラリ MIST(<http://mist.murase.m.is.nagoya-u.ac.jp/>)を使用している。

文 献

- [1] 出口大輔 林雄一郎 北坂孝幸 森健策 目加田慶人 末永康仁 長谷川純一 鳥脇純一郎 “多時相 CT 像からの CT 値の確率分布推定に基づく肝臓領域抽出” コンピュータ支援画像診断学会論文誌, Vol.9, No.4, 2006
- [2] Wells III, W.M., Viola, P., Atsumi, H., Nakajima, S., Kikinis, R., “Multi-modal volume registration by maximization of mutual information, Medical Image Analysis,” Volume 1, Issue 1, pp.35-51, 1996.
- [3] Rueckert, D., Sonoda, L.I., Hayes, C., Hill, D.L.G., Leach, M.O., Hawkes, D.J., Nonrigid registration using free-form deformations: Application to breast MR images, IEEE Transactions on Medical Imaging, Volume 18, Issue 8, August 1999, Pages 712-721.
- [4] T. Ishida, S. Katsuragawa, H. Abe, K. Ashizawa, K. Doi “Development of 3D CT Temporal Subtraction based on nonlinear 3D image warping Technique,” Proc. The 91th Radiological Society of North America(RSNA), 111, 2005.
- [5] 澤田匡秀, 目加田慶人, 鳥脇 純一郎, 平澤 宏裕, 鷺見和彦, 村瀬 洋 “パラメトリック固有空間法による医用 3 次元画像の位置合わせ”, 日本医用画像工学会大会, 2009 (発表予定)
- [6] 目加田慶人, 平澤宏祐, 鷺見和彦, 村瀬 洋: “医用 3 次元画像のパラメトリック表現と画像間位置あわせ”, 電子情報通信学会技術報告, MI2007-112, Vol.107, No. 461, pp. 271-276, Jan. 200.
- [7] 目加田慶人, 平澤宏祐, 鷺見和彦, 村瀬 洋: “固有空間法による医用 3 次元画像の高速な位置あわせ”, 電子情報通信学会技術報告, MI2007-35, Vol.107, No.220, pp.1-4, Sep. 2007
- [8] 村瀬洋, シュリー ナイヤー “2 次元照合による 3 次元物体認識-パラメトリック固有空間法-, ”電子情報通信学会論文誌 D-II Vol.J77-D-II No.11 pp.2179-2187 Nom.1994