

令和 2 年 4 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H06480・19K21545

研究課題名(和文) 動的変形および個体間形状差を記述した多元心臓統計的形状モデルの構築

研究課題名(英文) Construction of multi-dimensional statistical shape model for heart describing both cardiac deformation and inter-individual differences of cardiac shape

研究代表者

宮内 翔子 (Miyuchi, Shoko)

九州大学・システム情報科学研究所・助教

研究者番号：40828555

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：統計的形状モデル(Statistical Shape Model: SSM)は、対象臓器形状の個体差を、その平均形状と、平均形状からのばらつきを用いて定量的に表現する手法である。各患者の臓器形状に合わせてSSMを変形することで、患者固有の臓器を、少数のパラメータで定量的に表現できる。臓器自身の自発的な動きがない骨や肝臓のような静的臓器に対するSSM構築法は、すでに確立されている。一方、周期的に形が変わる心臓や肺などの動的臓器に対する手法は少ない。そこで、本研究では、動的臓器の一つである心臓を対象として、心臓形状の個体差と、周期的な形状変化を同時に記述する多元心臓SSM構築法を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構築した多元心臓SSMを各患者の臓器形状に合わせて変形することで、患者固有の心臓形状を、少数のパラメータで定量的に表現できる。得られたパラメータを用いることで、患者の臓器形状に適した治療・診断システムの構築が可能となり、心疾患に対する治療・診断精度を飛躍的に向上できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Statistical Shape Model (SSM) of a target organ quantitatively describes individual differences of the organ shapes using their average and variance. By deforming the SSM to fit an organ shape of a patient, the organ shape enables to be represented by a small number of parameters. Although conventional SSM constructions have focused on only motionless organs such as bones, there are few SSMs for a heart that describe the deformation of the heart. Therefore, we constructed a multi-dimensional SSM for the heart that considers not only shape differences among individuals but also sequential deformation within the cardiac cycle.

研究分野：医用画像情報処理

キーワード：多元心臓統計的形状モデル 心臓MRI 3次元メッシュモデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

2.1. 研究開始当初の背景

人体臓器は、形が不変な静的臓器と、呼吸などによって形が変わる動的臓器に大別できる。後者の代表的な臓器である心臓は、左右心房・左右心室の4領域が協調して複雑に変形しながら、周期的に収縮・拡張している。このような心臓の周期的動き(拍動)を正確に把握することは、治療・診断において重要である。しかし、拍動している心臓は、撮影に高度な技術を要する。撮像状況次第では、雑音を含む部分的な形状情報しか撮れず、画像のみを用いた正確な形状把握は困難であるため、治療・診断精度は医師の力量に依存する。

統計的形状モデル(Statistical Shape Model: SSM)は、人体臓器形状の個体差を、平均と分散を用いて定量的に記述する手法であり、臓器の部分的な形状データと SSM を組み合わせることで、全体形状を推定できる。この利点のため、骨折前の骨形状の復元や人工股関節の決定など、様々なコンピュータ支援治療・診断システムで利用されている。

しかし、従来の SSM は、骨のような静的臓器における個体間の形状差のみを対象とし、心臓のような動的臓器にみられる臓器自身の変形は記述できない。更に、心臓には内部構造がある。したがって、拍動1回分の収縮・拡張の過程(心周期)における心臓全体やその内部構造の変形まで含めた心臓 SSM が構築できれば、一時刻の形状情報のみから患者固有の動きを高精度・高精度に推定することが可能となり、治療・診断の効率化および精度の飛躍的な向上が期待できる。

2. 研究の目的

動的臓器の中でも特に動きが複雑な心臓を対象として、(1) 心臓の動きを記述する心周期 SSM の構築、およびこの心周期 SSM を用いた(2) 個体間の形状差と心臓の動きを共に記述する多元心臓 SSM の構築を行う。

3. 研究の方法

図1に多元心臓 SSM 構築法の流れを示す。この SSM 構築では、Gaussian Process Dynamical Model(GPDM)[1]を用いて、周期変形時の各時刻の形状および心臓の動きを、それぞれ潜在空間内の1点および一つの閉曲線として表す。複数の心臓の動きをそれぞれ閉曲線で表し、それらを基に、潜在空間における閉曲線として表現される多元心臓 SSM を構築する。多元心臓 SSM によって得られる閉曲線に対し、GPDM の潜在空間から元の3次元空間への写像関数を適用することで、心周期中の各時刻における心臓の3次元形状を得る。

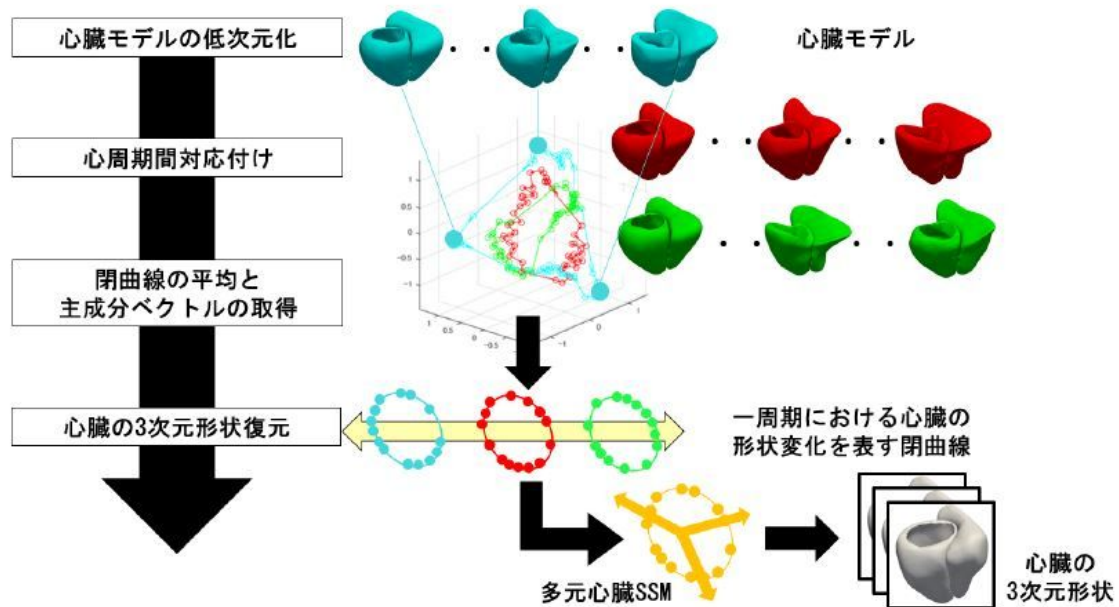


図1 多元心臓 SSM 構築の流れ

(1) 心臓モデルの構築

心臓の MRI 画像である Cardiac Magnetic Resonance (CMR) 画像は、心臓の容積、質量、駆出率などを評価するために用いられる。本研究では、UK Biobank[2] にある健常者 246 名の CMR 画像を用いて左右心室モデルを作成する(図 2)。ここで、各 CMR 画像は、拡張末期から撮影を始め、一心周期以上の心臓の動きを撮影した 50 フレームからなる。まず、各時刻の CMR 画像に Fully convolutional networks (FCN) を適用し、左右心室領域を抽出する[3]。次に、基準となる左右心室のメッシュモデルを、抽出した左右心室の領域に合わせて変形する[4]。これにより、全ての左右心室形状を、基準となる左右心室モデルのメッシュ構造で記述でき、各心臓モデルの頂点同士の対応付けが可能となる。したがって、1 つの CMR 画像に対し、50 個の左右心室モデルを作成する。この 50 個の左右心室モデルの組を一つの心臓モデルとする。

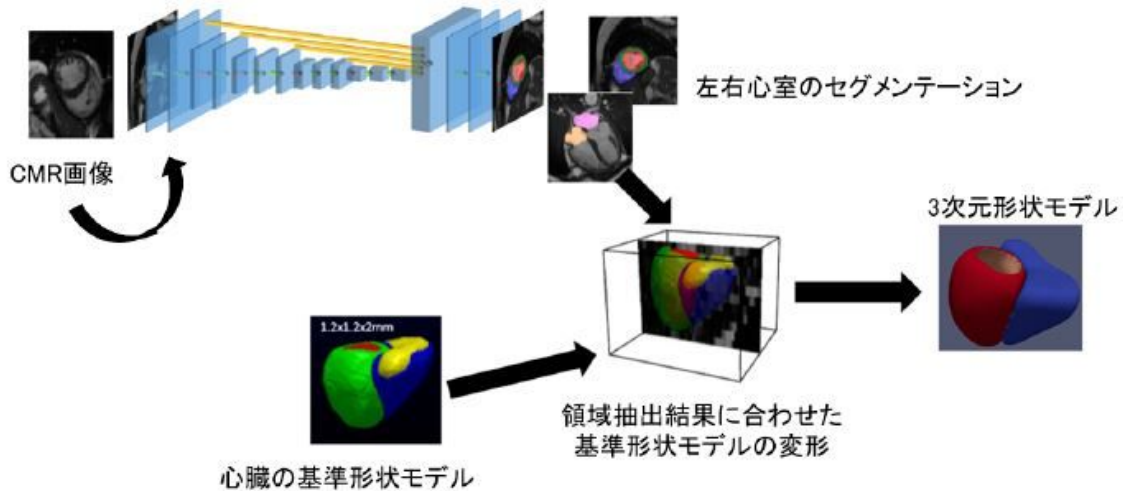


図 2 心臓モデル作成の流れ

(2) 心周期 SSM の構築

まず、心臓モデルを低次元ベクトルで記述するために、30 人分の各心臓モデルから、5 フレームを選び、形状の多様性のみを考慮した基準心臓 SSM を構築する。そして、基準心臓 SSM を用いて、全ての心臓モデルの形状パラメータを取得する。次に、同一構造の左右心室メッシュモデルで構成された 30 人分の心臓モデルに対し、その対応関係から各フレームの平均心臓形状を求める。求めた平均心臓形状を基準心臓 SSM で復元し、各フレームの形状パラメータを得る。得られた 50 フレーム分の形状パラメータを基準データとする。この基準データに対して GPDM を適用することで、心周期全体の心臓の形状変化を閉曲線で表現する潜在空間を求める。このとき、一周期内の各心臓モデルは、潜在空間内の 1 点で表される(図 3)。そこで、一周期分の点群を一つの 3 次スプライン曲線によって表すことで、フレーム間の形状変化を滑らかに補間できる。本研究では、この滑らかな曲線を心周期 SSM と呼ぶこととする。

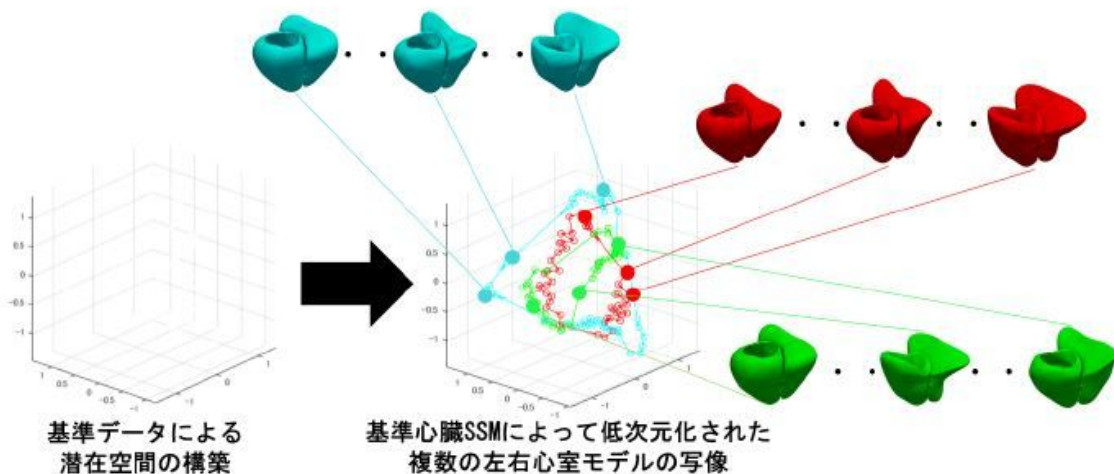


図 3 GPDM を用いた一周期における形状記述の低次元化の流れ

(3) 多元心臓 SSM の構築

全ての心臓モデルに対応する閉曲線を得た後、心周期中の形状変化と相関のある心室容積曲線を用いて、異なる心臓モデルの心室容積曲線間に対応付ける。この対応付けには、動的時間伸縮法(Dynamic Time Warping:DTW)を用いる。これにより、周期中の特徴的な形状間に対応付けつつ、心室容積曲線全体に対応付けられる。得られた異なる心臓モデルの心周期間の対応に基づき、全ての閉曲線に主成分分析を適用することで、平均曲線と平均閉曲線からのばらつきを表す主成分ベクトルを取得する。得られた主成分ベクトルの重み付き線形和を多元心臓 SSM とする(図 1)。また、潜在空間から元の 3 次元空間へ写像することで、心周期中の動きに対応した心臓の 3 次元形状を得られる。

4. 研究成果

当初は心臓の内部構造の変形まで含めた解析を予定していたが、心臓の表面形状の変形が想定以上に複雑であったため、今回の研究では表面形状のみを対象とした解析に変更して実験を行った。構築した多元心臓 SSM の有効性を確認するため、多元心臓 SSM の構築に使用した 30 人分の心臓モデル(学習モデル)と、SSM 構築に使用しなかった 216 人分の未知の心臓モデル(テストモデル)の 3 次元形状復元精度を検証した。元のモデル形状と提案手法により復元したモデル形状の誤差は、2 つのモデルの対応点間の距離の平均二乗和とした。学習モデルとテストモデルにおける誤差は、学習モデルが $3.47 \pm 1.23\text{mm}$ であり、テストモデルが $3.37 \pm 1.38\text{mm}$ であった。ここで、成人の心臓の心尖部から心基部までの長さの平均値に対する、元の心臓モデルと復元した心臓モデルの頂点間距離誤差を誤差率とする。学習モデルとテストモデルの各誤差率の平均値は、学習モデルが $2.89 \pm 1.02\%$ 、テストモデルが $2.80 \pm 1.15\%$ であり、精度良く復元できていることが確認できた。

しかし、復元した心臓の動きを確認したところ、元の心臓の動きに対し不自然な動きが見られた。そこで、多元心臓 SSM を構築する際に、誤差が発生しやすい処理について調査した。その結果、GPDM の次元削減による誤差が最も大きかった。潜在空間の構築に用いた心臓モデルの誤差は $0.45 \pm 0.21\text{mm}$ であり、元の心臓モデルの動きを滑らかに表現できている。したがって、多元心臓 SSM の形状復元精度は、GPDM の潜在空間の構築に用いる心臓モデルの周期的な形状変化の特徴に大きく依存すると考えられる。今後は、心臓の多様な動きを高精度で記述できる潜在空間の構築するため、時系列データに対する次元削減法を改良する予定である。

参考文献

- [1] Wang, J.M., "Gaussian Process Dynamical Models for Human Motion.", In IEEE TPAMI, 283-298, 2008.
- [2] UK Biobank Improving the health of future generations [https://www.ukbiobank.ac.uk/] (最終検索日: 2019 年 10 月 3 日)
- [3] Wenjia Bai, Email., "Automated cardiovascular magnetic resonance image analysis with fully convolutional networks.", JCMR, ISSN:1532 -429X, 2018.
- [4] Jinming Duan., "Automatic 3D bi-ventricular segmentation of cardiac images by a shape-refined multi-task deep learning approach.", In IEEE TMI, 1-1, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shoko Miyauchi, Ken'ichi Morooka, Yasushi Miyagi, Takaichi Fukuda, Ryo Kurazume
2. 発表標題 Volumetric Brain Model Mapping for Constructing Volume Statistical Shape Model
3. 学会等名 2019 Joint International Workshop IWAIT-IFMIA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内林光優, 宮内翔子, 諸岡健一, Jinming Duan, Wenjia Bai, Daniel Rueckert, 倉爪亮
2. 発表標題 Gaussian Process Dynamical Model を用いた多元心臓統計的形狀モデルの構築
3. 学会等名 電子情報通信学会 医用画像 (MI) 研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ホームページ http://fortune.ait.kyushu-u.ac.jp/~miyauchi/

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----