

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：25403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500552

研究課題名(和文)心電図同期心臓CT画像における左心室壁運動の解析

研究課題名(英文)Analysis of left ventricular wall motion in the ECG-gated CT image

研究代表者

青山 正人(AOYAMA, Masahito)

広島市立大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：40285424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：心拍による動き(時間変化)を含む四次元的心臓CT画像を対象に左心室壁の運動の解析を行った。

壁運動を形状パラメータの変化として表現するパラメトリックな手法、対象データが持つ心拍による周期性に着目して、左心室の壁面上の点の対応関係を直接求めるノンパラメトリックな手法と運動による左心室壁厚の変化や軌跡を可視化するソフトウェアツールの開発も試みた。形状パラメータの変化を解析した結果、異常所見無しと有りの分類が行える可能性が示唆されるなどの成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：It was subjected to analysis of the movement of the left ventricular wall of the four-dimensional cardiac CT image including a motion due to heart rate.

We have studied (1) parametric techniques of expressing wall motion as a change of shape parameters, (2) non-parametric techniques for finding the correspondence between the points on the left ventricular wall based on the periodicity by the heartbeat, and (3) development of software tools to visualize changes and trajectory of the wall thickness.

As a result of analyzing the change of shape parameters, the possibility of distinction between normal and abnormal findings was suggested.

研究分野：医用画像診断支援

キーワード：動態解析 心臓CT 形状モデル 壁運動 球面調和関数 主成分分析

1. 研究開始当初の背景

(1) 平成 22 年度人口動態統計 (確定数) によると、我が国における心疾患による死亡数は悪性新生物に次ぐ第二位であり、約 19 万人 (約 16%) もの人が亡くなっている。

(2) CT 装置や処理コンピュータといった機器の性能向上に伴い、得られる心臓 CT 画像も三次元データ+時間軸の四次元データとして獲得できるようになっただけでなく、空間解像度も上がるとともに画質自体も改善され、より細かい解析が要求されている。

(3) 従来研究は生体組織のリモデリングが主目的であるものが多く、臨床での利用を目指して開発されているとは言いがたい面がある。これに対し、臨床での実利用を指向しつつ、診断支援システムの構築に向けた研究を進めようとするものである。

2. 研究の目的

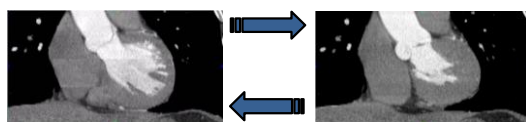
(1) 心臓の拍動に伴う左心室壁の運動 (移動) を解析することである。

(2) 心疾患の診断を行う際には、体循環のポンプ役を担っている左心室の壁運動を把握することが大切である。壁運動の表現に、ノンパラメトリックな手法である **Free-form Deformation (FFD)** とパラメトリックな手法である球面調和関数という観点が異なる二種類の工学的手法を採り入れ、客観性や再現性が高い壁運動の追跡やモデルによる表現について研究する。

(3) 解析結果の可視化や体積、壁厚の変化といった定量データの安定な計測と医師への適切な提示により、診断の質向上に寄与することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 対象画像は心臓の形状を表す三次元の画像データに心臓の拍動による形状変化 (一心拍を 20 等分 (時相に分割) した画像データが得られる) を持つ四次元画像データである。拡張末期、収縮末期にある画像の冠状面の二次元画像を図 1 に示す。この図から拡張



拡張末期 収縮末期

図 1: 対象画像 (冠状面)

期に造影剤で白く描出されている左心室 (体の正面から見ているので図では右側になる) の血液が、収縮運動によって、白い血液領域が収縮し体に送られている様子と、それに伴い、心臓の左心室の壁が厚くなっていること、

外壁も若干収縮していることなどを把握することができる。

(2) パラメトリックな手法とノンパラメトリックな手法について、並行に検討を進める。

① パラメトリック手法では、まず基底関数として球面調和関数を利用したパラメータ表現を検討する。このとき心臓の拍動による形状変化を表現するには球面調和関数を何段階まで用いるのが良いかという観点から検討する。さらに基底関数をあらかじめ既知である球面調和関数ではなく、画像データから抽出した左心室形状から主成分分析により決定し、そのパラメータ変化を分析することで、心拍や心疾患の有無を判定できるかどうかについても検討する。さらに心臓の四次元画像データから直接周期性に基づき FFD の変形パラメータを決定する手法についても検討する。

② 点ベースのノンパラメトリック手法で用いる FFD の概念を図 2 に示す (図 2 は簡単のため二次元であるが、実際は三次元である)。図 2 左のように格子状に配置した制御

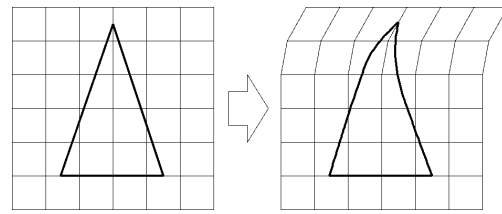


図 2: FFD

点で囲まれる領域内に物体がある場合に図 2 右のように制御点が移動したときに元の物体がどのように変形するかが表現できる手法である。画像データから得られる左心室壁の面上の点群について連続する二時相間で移動前後の対応関係を決定する。続いて、得られた対応関係の各点の誤差が最小となるように制御点の移動先を決定することで、制御点の移動として心臓の変形を表現する。この対応関係を求めるときに心拍の周期性を利用する。これは、対象データが一心拍という一周期分のデータなので、最初の時相で決めた開始点が一周期後に同じ点に戻るといった仮定を用いて対応関係を決定するものである。FFD の変形パラメータを、時相間の点群の対応関係から計算するという意味で、ここではノンパラメトリック手法に分類する。

(3) 左心室壁運動の計測および可視化について検討する。これは画像データから動きを追跡したい左心室壁の点をマウス入力により指定し、その点を中心とするテンプレート領域が次の時相でどの位置に対応するか画像データの類似度に基づいて追跡し、その結果を表示するとともに壁厚の変化もグラフとして示す。

4. 研究成果

(1) パラメトリック手法について

① 異常所見無しの症例、軽度、重度の心筋梗塞の三症例を対象に、球面調和関数を用いた心臓の三次元モデリングと動態解析を試みた。モデルの再現率が左心室、心臓外壁ともに96%を超えるのが次数8であった。再現したモデルを用いて三症例の壁厚計測を試みた結果を図3に示す(横軸は時相、縦軸は壁厚[mm])。異常所見無しの症例は8から9

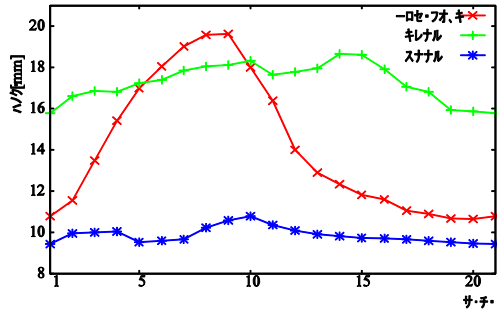


図3: 心筋の壁厚計測結果(平滑化適用)

時相目で大きな心筋の収縮が見られる計測結果が得られている(赤線)。それに対して軽度(緑線)、重度(青線)と重症になるにつれて、心拍による壁厚の変化が小さく左心室の収縮運動が弱いことを定量的に確認できる。球面調和関数によるモデルでの計測誤差は2mm以下で抑えられていることも確認できた。

② 異常所見無しの症例と心筋梗塞の症例について球面調和関数でモデリングしたが、異常所見無しの症例の形状パラメータを心筋梗塞の症例から得られた形状パラメータで置き換えることで疑似的に心筋梗塞になった場合の動きを表現できることを示した。大きさの変化に相当する次数0の形状パラメータを置き換えた結果を図4に示す。置き換

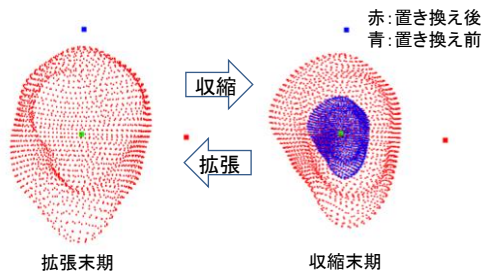


図4: 次数0の置き換え

え前の異常所見無しの収縮末期(図4右の青色)に対して、形状パラメータを心筋梗塞の症例のものに置き換えた場合、収縮が非常に小さくなっていることが分かる(図4右の赤色)。形状パラメータの主観的な調整ではなく、実データから抽出した動きに基づく動きの置き換えが行えていることが分かる。

③ 基底としてあらかじめ決まっている球

面調和関数ではなく、画像データから主成分分析を適用して求めたものを用いることで、データベースに含まれる症例の分類が行えるかどうかを、異常所見無し8症例、有り6症例を用いて検討した。入力によって基底が変化するが、ここでは異常所見無し1症例、有り2症例を用いたときに得られた結果を示す。具体的には3x20(症例数x時相数)の形状データから基底を作成した。そして第3主成分までを軸とする三次元空間に各症例の20時相分の形状変化を投影したものを図5に示す。赤色が異常所見無し、青色が有りの

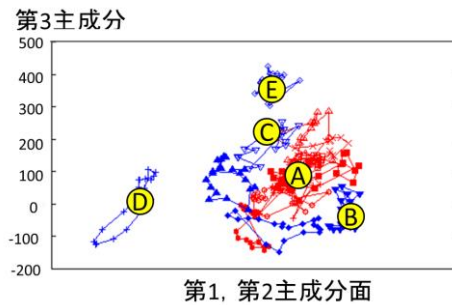
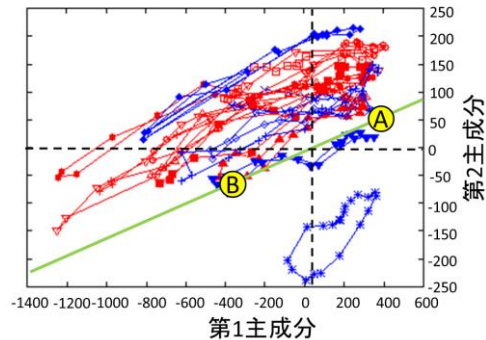


図5: 重み変化

症例である。各症例は20時相で一つのループを描いている。図5上図よりいずれの症例も緑色の線に平行になっており、A点、B点の形状を確認したところ、心拍に伴う左心室の収縮拡張に対応すると考えられた。またこの緑色の線を軸として、この方向から第1、第2主成分面を下面として三次元空間を見たものが下図である。中央付近の異常所見無しの症例を取り囲むように有りの青色が分布していることが分かる。この結果から機械学習などを用いれば異常所見有りを検出する診断支援につながる可能性があるという結果が得られた。

④ 次の(2)で成果を示す時相間の左心室の表面点の対応を点ベースで求める方法では、FFDによる変形パラメータを時相間で独立に求めている。対応点追跡には周期性を考慮するようにしているが、FFD適用時に局所解に陥り心拍による動きが一時停止する現象がみられた。そのため手法を検討し直し、すべての時相の同位置に配置したサンプル点の

輝度差の変化にもっともフィットするようにフーリエ係数、FFDの変形パラメータを推定した。このように周期性を持たせたまま変形パラメータを求めるようにした結果、得られたパラメータによる心筋の動きは、従来のように一時停止するような現象もなく、滑らかな動きとして再現できた。結果の一例を図6に示す。これは左心室壁上の一点について

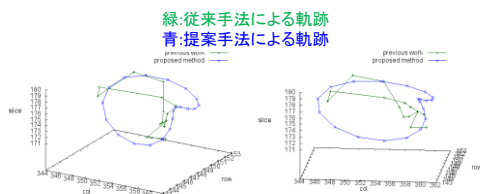


図6: 左心室上の一点の軌跡

異なる視点から見た軌跡であり、緑色が従来手法、青色が提案手法である。緑色の軌跡は直線的に一気に移動している部分が存在しているのに対し、青色の軌跡は、滑らかに弧を描くような軌跡が再現できていることが分かる。このように一周分のパラメータを同時推定するのは非常に大規模な計算であり、高性能なGPUを複数枚備えた高性能な計算環境により得られた成果である。

(2) ノンパラメトリック手法について

FFDを適用する際に用いる、時相間の対応点を決定する方法について検討した。左心室の表面点の心拍による動き追跡を行った対応点追跡結果をもとに、FFDによる心筋運動を解析するものである。対応点の追跡には三次元テンプレートマッチングを用い、評価関数や探索範囲の違いによる追跡結果への影響について評価した。評価に際して、対象データの特徴である周期性に着目して種々の検討を加えたが、以下の二通りの解釈としてまとめられる。

① 周期性を拡張末期から→収縮末期→拡張末期に戻ると捉える(順方向追跡)。順方向追跡は時間の経過通りに始点から終点まで対応点を追跡する単純な方法であり、今回の対象では、戻ってきた終点が始点に一致するのは限定的である。収縮した状態から拡張に転ずるときに少しでも妥当と思われる位置に戻ってくることは困難であった。テンプレートの動的な更新等も試みたが、改善は見られなかった。

② 周期性を拡張末期→収縮末期、拡張末期→(時間方向を逆向きに追跡する)→収縮末期の時間軸に対して二方向からの追跡と捉える(双方向追跡)。順方向追跡で発生した原因は収縮末期から拡張による広がり動作が変化する際、多少の追跡のずれが、時相の増加に伴い、さらに大きくなることであった。分析により、拡張末期から収縮末期の心筋が収縮する方向の動きには比較的

安定に追跡できることが分かったため、双方向追跡による結果を収縮末期で統合する方法を実現した。その結果、順方向追跡と比較して改善が見られた。改善の一例を図7に示す。図7左図(順方向追跡)より収縮末期か

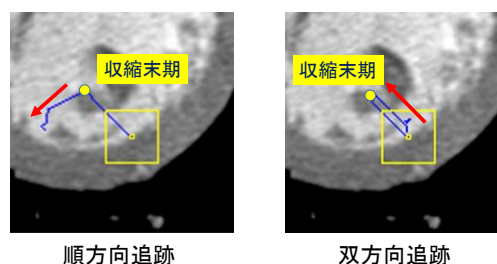


図7: 追跡手法の違いによる軌跡の比較

ら拡張に転ずるときに妥当と思われる位置から少しでもずれてしまうと不適切な結果となっているのに対し、右図(双方向追跡)では改善されていることが分かる。

(3) 壁厚計測について

(2)は、フリーソフトウェアのImageJのプラグインとして実装した。実装したツールの画面例を図8に示す、対話的に開始点を決定



図8: 実装画面例

し、さらにテンプレートマッチングで用いる評価関数、探索範囲の指定、などを行うことができる。さらに図9に追跡結果から左心室壁厚の時相による変化をグラフにしたものを示す。図9右上に示した位置を指定して実

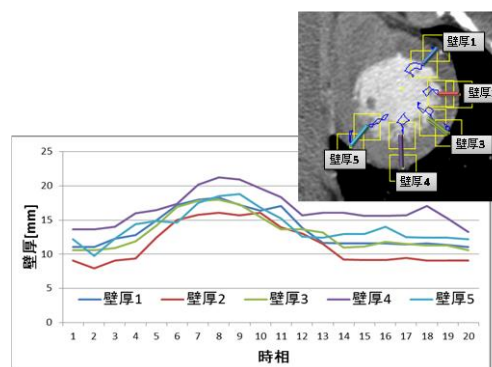


図9: 壁厚計測

行することで壁厚変化という定量データを簡便に得られるようにした。

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)

[学会発表] (計 7 件)

- ①松本尚、青山正人、増谷佳孝、山本秀也、木原康樹、心電同期 CT 画像における左心室の対応点追跡の検討、動的画像処理実利用ワークショップ(DIA)2015、2015年3月6日、「広島工業大学(広島県広島市)」
- ②松本尚、青山正人、古川亮、宮崎大輔、馬場雅志、日浦慎作、増谷佳孝、山本秀也、木原康樹、心電同期 CT 画像による心室動態解析のための高速な対応点探索の一手法、画像の認識・理解シンポジウム(MIRU)2014、2014年7月31日、「岡山コンベンションセンター(岡山県岡山市)」
- ③高谷一眞、青山正人、古川亮、青木広宙、宮崎大輔、馬場雅志、日浦慎作、山本秀也、木原康樹、主成分分析を用いた左心室形状の動態解析、電子情報通信学会医用画像研究会、2013年11月7日、「広島市立大学(広島県広島市)」
- ④浜岡裕之、古川亮、青山正人、馬場雅志、宮崎大輔、青木広宙、日浦慎作、周期性を考慮した FFD による心電図同期心臓 CT 画像の動態解析、電子情報通信学会医用画像研究会、2013年11月7日、「広島市立大学(広島県広島市)」
- ⑤中鷹良、青山正人、青木広宙、宮崎大輔、古川亮、馬場雅志、日浦慎作、心電図同期心臓 CT 画像における壁厚計測のための対応点追跡の評価、平成 25 年度(第 64 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会、2013年10月19日、「岡山大学(岡山県岡山市)」
- ⑥高谷一眞、青山正人、古川亮、青木広宙、宮崎大輔、日浦慎作、浅田尚紀、球面調和関数に基づく心筋運動のパラメータ変換の試み、ビジョン技術の実利用ワークショップ(ViEW)2014、2012年12月6日、「パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)」
- ⑦高谷一眞、青山正人、古川亮、日浦慎作、浅田尚紀、國田英司、山本秀也、木原康樹、球面調和関数を用いた心臓の3次元モデリングと動態解析、画像の認識・理解シンポジウム(MIRU)2012、2012年8月6日、「福岡国際会議場(福岡県福岡市)」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青山 正人 (AOYAMA, Masahito)

広島市立大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：40285424