

カテーテル治療シミュレーション機能を搭載した 術前計画支援システムの開発

土井章男（ソフトウェア情報学部、教授）、森野禎浩（岩手医科大学医学部、教授）、朴澤麻衣子（岩手医科大学、医師）、吉岡邦浩（岩手医科大学医学部、教授）、田代淳（岩手医科大学医学部、准教授）

<要旨>

構造心臓病は患者毎の解剖のバリエーションが多彩であるため、術前の治療計画が非常に重要であり、治療成績に直結する。そこで、術前に得られる画像情報である心臓領域の CT 画像、超音波画像、SPECT 画像を入力画像とした、機能面に優れた、操作性の高い、心臓内部を 3D で定量化するソフトウェアを研究開発する。今後の治療適応や症例数が飛躍的に拡大することを考慮すると、現代の循環器医療の最重要開発課題のひとつである。

1 研究の概要

現在、心疾患は日本人の死因の第 3 位であり、死因全体の 15.5%を締めている。その多くは狭心症や心筋梗塞に代表される虚血性心疾患である。虚血性心疾患の主な原因は冠動脈が動脈硬化やプラーク等により狭窄することで引き起こされる心筋の虚血である。虚血状態の心筋は栄養や酸素の不足により壊死や機能低下を招き、心臓機能に重大な欠陥を及ぼす。近年マルチスライス CT の性能向上に伴い、心疾患の診断のために心臓 CT 検査が盛んに行われるようになってきている。心臓 CT 検査は低侵襲であり患者の負担が小さく、検査の信頼性も高くなっている[1]。しかし心臓 CT 画像の検査数増加に伴い、CT 画像を読影する医師の負担が増加しており、読影の効率化をすることが求められている。虚血性心疾患の診断では虚血部に血液を送っている責任血管を特定することが重要となる。責任血管を特定し適切な処置を施すことにより虚血性心疾患の治療をすることができる[2]。

心臓治療は、大別すると心筋に酸素および栄養を送る動脈である冠動脈に着目した**冠動脈疾患**とそれ以外の**非冠動脈疾患**に分けられる。冠動脈疾患は、冠動脈の血流量が減少することで動脈硬化、胸痛、狭心症、急性心筋梗塞等が発症する。治療には、狭窄した血管のバイパス手術やその内部にバルーンカテーテルを挿入して、血管内部を拡張することで、血流を確保することが行われている。

非冠動脈疾患は「**構造心臓病**」（「ストラクチャー・ハート・ディジーズ」、SHD と略される）と呼ばれており、病名としては、大動脈弁狭窄症、心房中隔欠損症、僧帽弁狭窄症、閉塞型肥大型心筋症などが挙げられる。どの症例も放置すると急性心筋梗塞や心不全になる可能性がある。近年、構造心臓病に対するカテーテル治療が注目されているが、構造心臓病は患者毎の解剖のバリエーションが多彩であるため、術前の治療計画が非常に重要であり、治療成績に直結する。現状では、国内外の非冠動脈疾患に関する領域の研究開発は非常に遅れている。また、従来の商用の医用画像処理システムは、主に静的な画像

を対象としており、その製品価格は非常に高価であり、機能も冠動脈疾患に特化している。また、研究用途のオープンなシステム（Osirix、ImageJ、3D Slicer など）は利用可能であるが、心臓特有の軟部組織臓器や心臓弁に着目したシステムでないため、機能面においても不十分である。そこで、心臓外科医からの要望が多い以下の機能に着目した心臓内部を定量化するソフトウェアを研究開発する。

- 1) テイラーメイドな 3D デジタル心臓モデルの構築
- 2) 大動脈、冠動脈、心臓内腔の自動検査機能
- 3) 仮想カテーテルの配置・治療シミュレーション機能

上記機能を用いて、臨床応用を行いながら、その機能や精度、使い易さを向上させる。また、本機能で作成した手術計画案と従来からの手術計画案を比較検討し、その有効性を評価する。本機能を実現することで、多くの医師が多彩な臨床研究が可能となり、手術の治療成績の向上や医師の手術負担の軽減が可能となる。本ソフトウェアにより、1) 冠状動脈の病変や閉塞状態を初期状態で発見することにより、心不全や心筋梗塞を予防、2) カテーテル手術の成功率向上や患者の QOL（Quality Of Life）を高めることが可能となる。

2 これまで得られた研究の成果

2.1 肺静脈および肺動脈の削除

最初にハフ変換による誤検出を防ぎ、領域拡張を行った際に抽出領域が肺動脈に達してしまうことを防ぐために肺動脈部分および空気部分の削除を行う。肺動脈の削除は判別分析法とモフォロジー処理を組み合わせで行う。

まず判別識別法を用い空気部分の抽出を行う。CT 画像では空気部分は輝度値が著しく小さくなるため、三次元心臓 CT 画像に対して、判別識別法を適用することで画像の空気部分の輝度値を特定できる。空気部分は画像の輝度値の最小値と判別分析を行い算出された閾値の間

となる。空気部分は肺内部の空気部分も含まれる。肺動脈および肺動脈は細い管形状をしているため、空気部分にクロージング処理を行うことで肺静脈および肺動脈の削除を行った肺内部の領域を得ることができる。この肺静脈と肺動脈の削除を行った肺内部の領域を三次元心臓 CT の元画像から差し引くことで肺静脈および肺動脈の削除を行う。肺静脈と肺動脈の削除を行う前の心臓 CT 画像のボリュームレンダリング画像を図 1 に示す。本肺動脈の削除を行った心臓 CT 画像のボリュームレンダリング画像を図 2 に示す。図 1 において、胸腔領域に無数に表れている細い管形状の構造が肺静脈と肺動脈である。図 2 では肺静脈と肺動脈が削除されている。

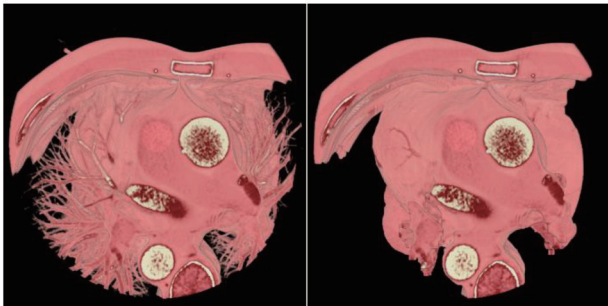


図 1 削除前

図 2 削除後

2.2 ハフ変換による上行大動脈の位置の特定

ハフ変換で心臓 CT のアキシャル断面スライス画像から円形部の抽出を行い、上行大動脈の位置の特定を行う。上行大動脈はアキシャル断面上ではほぼ円形を為すためハフ変換により位置の特定が可能である。ノイズ除去とエッジ検出を行ったアキシャル断面画像を図 3 に示す。画像中心付近の白い円形部分が上行大動脈である。

ハフ変換を行う前に誤検出を減らすためにアキシャル断面スライス画像にガウシアンフィルタを適用することでノイズを除去する。しかしガウシアンフィルタを適用しただけではエッジがぼやけてしまうため、ガウシアンフィルタを適用したあとにアンシャープマスキングフィルタを適用しエッジの強調を行う。この処理を複数回繰り返すことでエッジを保ったままノイズの除去を行う。

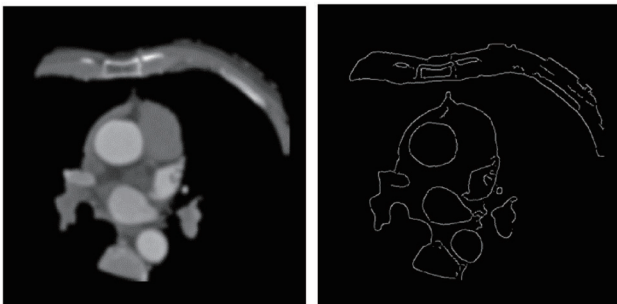


図 3 エッジ検出とエッジ検出

2.3 上行大動脈および冠動脈の抽出

本研究では上行大動脈から領域拡張を行うことで冠動脈を抽出する。上行大動脈は冠動脈とつながっており、領域拡張を行うことで冠動脈の抽出が可能となる。

領域拡張を行うにあたりそのシード点を決定する。シード点はハフ変換により抽出された円の中心座標を用いる。まずハフ変換により抽出された円から領域拡張法のシード点となる円を選択する必要がある。ハフ変換により取得される円は上行大動脈、下行大動脈、背骨部分およびその他の血管部分に分けられる。シード点となる円は上行大動脈の円でなければならない。円の選択には円の半径と中心座標の輝度値、円の中心座標を用いる。まず背骨部分およびその他の血管部分の円を上行大動脈の候補から削除する。削除には円の中心座標の輝度値を利用する。心臓 CT 画像では造影剤を使用しているため上行大動脈部分の中心点は背骨部分およびその他の血管部分の中心点よりも輝度値が高くなる。そのため円中心の輝度値が小さい円は上行大動脈部分ではないため、上行大動脈の候補から削除する。次に下行大動脈部分の円の削除を行う。下行大動脈は上行大動脈に比べて血管の半径が小さくなる。抽出された円の半径が小さいものを削除することで下行大動脈の円を上行大動脈の候補から削除する。これらの処理を行い上行大動脈以外の円を候補から削除した後、円の奥行情報についてソートし中央値をとった円の中心座標を領域拡張法のシード点とする。

図 4 に領域拡張法により上行大動脈および冠動脈の抽出を行った心臓 CT 画像のボリュームレンダリング画像を示す。

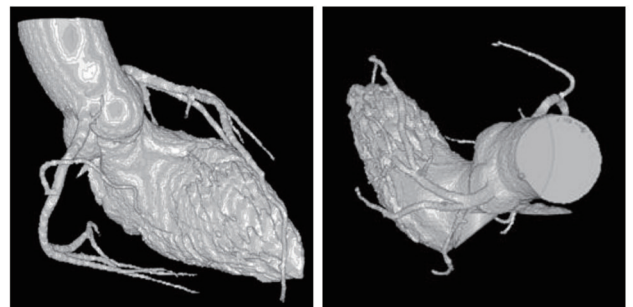


図 4 上行大動脈および冠動脈の抽出結果

2.4 冠動脈の特定

冠動脈を特定するために上行大動脈および冠動脈の抽出を行った画像に対して再度領域拡張を行う。上行大動脈および冠動脈を行った画像(図 10)で抽出されている画素とハフ変換により取り出したシード点とのについてユークリッド距離を求める。冠動脈は心臓を覆うように位置することを利用し、ユークリッド距離情報をもとに複数ボクセルを選び冠動脈を特定するために行う領域拡張のシード点とする。冠動脈が他の心臓構造と密着している場合や抽出領域が上行大動脈に達するのを防ぐために、

あらかじめ領域拡張を行わない領域を求めるために、オープニング処理を行ったマスク画像を保存する (図 5)。

作成したマスク画像を領域拡張を行わない領域とし、領域拡張を再度行い冠動脈の特定を行う。冠動脈の特定を行った画像を図 6 に示す。

2.5 冠動脈末端部の抽出

心臓 CT 画像において造影剤の浸透率が高い上行大動脈では輝度値が高く、造影剤の浸透率が低い冠動脈末端部では輝度値が低くなる。また冠動脈末端部では心筋部分との輝度差が小さくなっている。この 2 つの理由により、通常の領域拡張法では領域拡張法の適切な閾値の設定が難しくなる。心筋部へ広がることを防ぎつつ冠動脈末端部の抽出を行うために、冠動脈が広がっている方向に領域拡張の検出強度を強め、冠動脈の方向情報を考慮した領域拡張を行う。冠動脈の広がり方向を求めるために、まず冠動脈の画像に細線化処理を行う。冠動脈の細線化には図形の回転依存性を考慮しユークリッド距離変換を用いた逐次型細線化アルゴリズムを使用する[6]。細線化を行った後の冠動脈の画像を図 7 に示す。

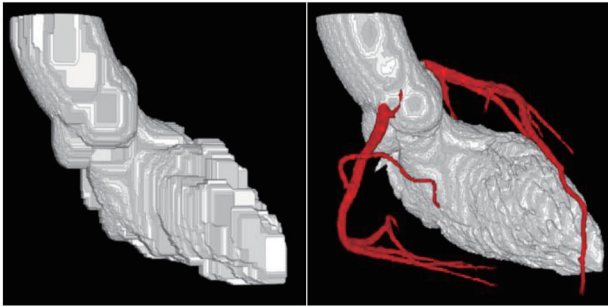


図 5 マスク画像

図 6 冠動脈の特定結果

冠動脈の方向情報を考慮した領域拡張法では端点をシード点とする。冠動脈の方向情報を考慮した領域拡張法ではシード点と拡張する画素間の輝度差の閾値 (GLOBAL 閾値) をすでに抽出されている冠動脈の輝度値の標準偏差 t とする。標準偏差 t の計算式を式(1)に示す。式(2)において m_i は冠動脈のボクセルの輝度値を表す。 \bar{m} は冠動脈のボクセルの輝度値の平均値を表し、 n は冠動脈のボクセルの個数を表す。

$$t = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (1)$$

冠動脈の方向情報を考慮し閾値を設定するために拡張する画素間の輝度差の閾値 (LOCAL 閾値) を方向情報ベクトルから動的に設定する。まず領域拡張法でシード点から現在拡張しようとしている候補点へのベクトル S を

求める。つぎに方向情報ベクトル D とシード点から候補点へのベクトル S とのコサイン類似度 c を求め、冠動脈の輝度値の標準偏差 t とコサイン類似度 c を乗算した値を拡張する画素間の輝度差の閾値 (LOCAL 閾値) p とする。方向情報ベクトル D とシード点から候補点へのベクトル S とのコサイン類似度 c を求める式を式(2)に示す。拡張する画素間の輝度差の閾値 (LOCAL 閾値) p を求める式を式(3)に示す。

$$c = \frac{\vec{D} \cdot \vec{S}}{|\vec{D}| |\vec{S}|} \quad (2)$$

$$p = c \cdot t \quad (3)$$

冠動脈の方向情報を考慮した領域拡張法により冠動脈末端部の抽出を行った画像を図 8 に示す。

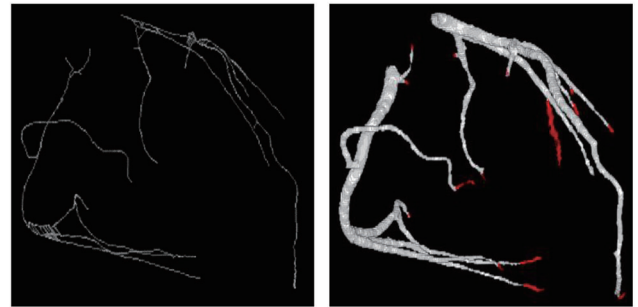


図 7 細線化画像

図 8 末端部の抽出画像

2.6 左心室の近似

冠動脈を抽出した後に冠動脈の位置情報から左心室の近似を行う。最初に左心室内部の造影剤部分の特定を行う。左心室は解剖学的にバルサルバ洞から冠動脈の走行方向との間にある。バルサルバ洞の位置は冠動脈と上行大動脈の境界から特定できる。すでに抽出されている冠動脈の走行情報とバルサルバ洞の位置情報から左心室内部の造影剤部分の特定を行う。特定された左心室内部の造影剤部分に膨張処理を行うことで左心室の近似を行う。

この際、判別分析の解析結果をもとにそれ以上広がらない領域を求める。冠動脈と膨張処理を行っている部分が重なるまで膨張処理を繰り返し、重なった時点で膨張処理を終了する。図 9 に左心室内部の表示した画像を示す。図 10 に左心室内部の造影剤部分に膨張処理を行い左心室の近似を行った画像を示す。

3 今後の具体的な展開

最先端の心臓弁膜症治療では、新しいカテーテル (図 11) による大動脈弁治療が着目されており、胸を開かず、また、心臓を止めることもなく、「人工弁」を心臓に装着するため、患者への負担を最小限に抑えることが可能に

なっている(「経カテーテル大動脈弁治療(Transcatheter Aortic Valve Implantation:TAVI)」と呼ばれている)。本人工弁の装着には、術前に得られる画像情報である心臓領域の CT 画像、超音波画像を入力画像とした、機能面に優れた、操作性の高い、心臓内部を 3D で定量化するソフトウェアが必要不可欠である。また今後の治療適応や症例数が飛躍的に拡大することを考慮すると、現代の循環器医療の最重要開発課題のひとつである。

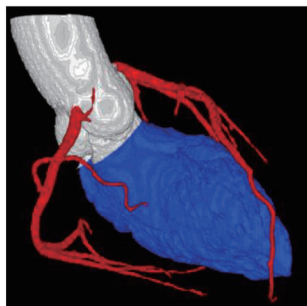


図 9 造影剤の特定結果

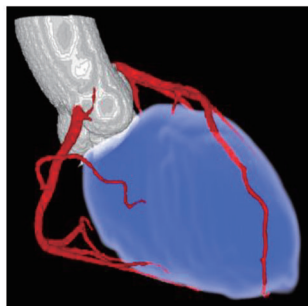


図 10 左心室近似結果

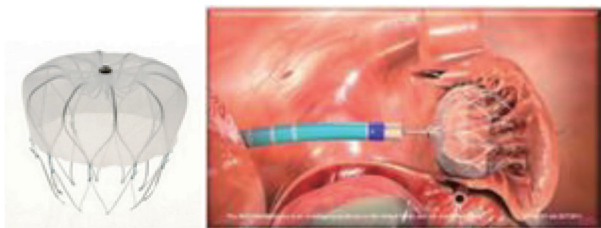


図 11 左心耳閉鎖デバイス Watchman と左心耳閉鎖術

4 論文・学会発表等の実績

- 1) 小川一, 土井章男, ” 仮想の刺鍼トレーニングの検討 (第 2 報) - 弾性体刺鍼による応力と刺入操作の安定性 - ”, 第 66 回 (公社) 全日本鍼灸学会学術大会東京大会 詳録集, p182-090, 東京大学本郷キャンパス, 2017/6/10-11.
- 2) 関村匠斗, 土井章男, 加藤徹, 朴澤麻衣子, 森野慎浩, ” 心臓 CT 画像からの冠状動脈と左心室の自動抽出法 ”, 電子情報通信学会医用画像研究会, 2017/5/25-26, 名古屋工大.
- 3) 関村匠斗, 土井章男, 朴澤麻衣子, 森野慎浩, ” 3 次元心臓 CT 画像からの自動冠動脈抽出に関する研究 ”, 第 79 回情報処理学会全国大会 (学生奨励賞), 2017/3.
- 4) 土井章男, 関村匠斗, 加藤徹, 朴澤麻衣子, 森野慎浩, ” 心臓カテーテル手術のための術前計画支援に関する基礎的検討 ”, 日本バーチャリアリティ学会第 30 回テレマージョン技術研究会 (可視化情報学会見える化研究会との合同研究会), Vol. 021, No. TTS03, 2016.
- 5) 1) M. Hozawa, Y. Morino, Y. Matsumoto, K. Yoshioka, R. Tnaka, T. Tashiro, A. Kumagai, K. Nagata, A. Doi, ” Morphology and Functional Characteristics of

the Left Atrial Appendage”, TOPIC2016(Tokyo Percutaneous cardiovascular Intervention Conference 2016), 2016/7.

6) A. Doi, K. Takahashi, T. Kato, T. Mawatari, and S. Ichinohe, "A pre-operative plan assistance of surgical instruments and metal plates for disease of bone", 21st Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 2016), Beppu, Japan, 2016/1.

7) Y. Hosokawa, D. Urata, A. Doi, T. Takata, Y. Abe, "The Trial Operation of the Motion Capture to Trace Female Divers in the underwater and the Trial Production of the Motion Viewer for Developing the Virtual Diving Experience Learning System", The 21st Int. Symp. on Artificial Life and Robotics 2016(AROB 21st 2016), Beppu, Japan, pp. 483-486, 2016/1.

8) 土井章男, 菊池昭彦, 野口恭子, "トレーニングシステム", 特願 2016-082398, 特許出願人(岩手県立大学, 岩手医科大学), 2016/4.

5 受賞・特許

1) 2017/6/10-11 第 66 回全日本鍼灸学会学術大会東京大会にて、原著論文「小川一, 土井章男, ”経穴取穴に関する解剖学的構造(骨・筋)の可視化及び 3D モデルの作製と教育的効果(第 1 報)”, 全日本鍼灸学会雑誌, 65 巻 4 号, 256-264, 2015」が、高木奨励賞を受賞。

6 謝辞

本研究では、JSPS 科研費 26350541 (基盤 C) 「テラード医療に向けた術前・術中支援システムに関する基礎的研究」、公益財団法人 JKA の平成 29 年度補助事業「心臓カテーテル手術を支援する心臓定量化ソフトウェアの研究開発」の研究助成を得ました。ここに謝意を表します。

7 参考文献

- [1] 元山 貞子 “虚血性心疾患の診断における CT の有用性” 冠疾患誌, vol22, pp.106-110, 2016
- [2] 松田 豪, 野崎 敦, 佐久間 肇, 河田 七香, 竹田 寛, 本康 宗信, 中野 起, ” MRI を用いた虚血性心疾患検査の現状” 日本放射線技術学会雑誌 57(6), pp.664-670, June.2001