

博士論文審査報告書

論文題目

Research on Medical Image
Processing Technologies for Fetal
Surgical Navigation

胎児の手術ナビゲーションのための
医用画像処理技術に関する研究

申請者

氏名

徐

榮

Rong

Xu

専攻およびプロ
ジェクト研究名
(課程内のみ)

国際情報通信学専攻
画像処理研究Ⅱ

2014年4月

近年の内視鏡画像や超音波画像等の視覚化技術や手術具の進歩に伴い、従来切開を用いていた手術の多くが、患者への負担が小さく、コストも低い低侵襲手術に置き換わってきている。その一例として胎児の横隔膜ヘルニア（CDH：Congenital Diaphragmatic Hernia）がある。CDHは、横隔膜に穿孔が生じ、胃等の内臓が孔を通して胸腔に侵入することにより肺の成育を著しく阻害するため、胎児の誕生直後の呼吸困難の原因となり、CDHを患った胎児のほとんどが死亡する深刻な障害である。CDHの治療のためにFETO（Fetoscopic Tracheal Occlusion）と呼ばれる手術が施される。FETOは胎児の気管にバルーンを設置して胸腔の気圧を高めることにより、内臓の侵入を防ぐ。FETOは当初母親の腹部を切開して胎児を取り出して行われていたが、手術中の胎児の死亡率が高い危険なものであった。そのため、内視鏡カメラや手術具を、母親の腹部表面に設けた小さな孔から挿入してFETOを行う低侵襲手術が行われるようになってきた。しかし、医者には熟練したスキルが要求され、手術の成功率も高くない。

FETOを安全かつ簡便に行うためには、自動的に手術具を気管に導いてバルーンを設置することができる手術ナビゲーションの実現が有効である。最近、可撓性が高く、様々な曲げ方の実現が可能な手術具（以下、「手術具」と記す）が開発され、胎児の気道への手術具の挿入の安全性が向上したものの、依然として手術ナビゲーションの実現の重要性は高い状況である。手術具を用いるFETOのための手術ナビゲーションを実現するためには様々な技術を実現する必要があるが、本論文では、医用画像処理技術（1）～（3）を検討課題としている。

（1）胎児の顔の検出

3次元超音波画像から胎児の顔を検出し、手術具を動かすべき方向を決定できるようにする。

（2）手術具と胎児の口の検出

3次元超音波画像から手術具を検出するとともに、曲り度合いを推定し、手術具の先端と胎児の顔との位置関係を把握できるようにする。

手術具の先端に装着した内視鏡カメラにより獲得される動画像から胎児の口を検出し、手術具を口にナビゲートするための情報を得られるようにする。

（3）胎児の気管の位置の推定

3次元超音波画像中では通常直接的には検出できない気管の位置を推定する。

さらに本論文では（1）～（3）の手法に必要な基本的な画像処理技術（a）～（c）の提案と検討を行っている。

（a）領域分割

（1）の処理の要素技術と位置付けられ、3次元超音波画像を領域分割し、胎児の顔と頭に対応する領域を検出する。（b）の前処理でもある。

（b）楕円検出

画像中の楕円を検出する技術で、（1）における胎児の頭部の検出、（2）における胎児の口の検出のために、それぞれ用いられている。（c）の処理にも用いられている。

（c）3次元超音波画像のキャリブレーション

3次元超音波画像の座標系と、世界座標系や局所座標系との変換行列を正確に求める技術であり、（1）～（3）に用いられている。

なお、将来の臨床実験の第一歩として、上記の検討には胎児模型（胎児ファントム）を使用している。

本論文は申請者が本研究科博士後期課程学生として在学していた期間、およ

び本学国際情報通信研究センター招聘研究員としての期間に行った研究をまとめたものである。本論文は英語で執筆されている。以下、本論文の各章の概要を述べ、評価を加える。

第1章「Introduction」では、研究の背景、従来の関連研究、本論文の目的と提案手法の概要、本論文の構成を述べている。

第2章「Overview of IGP Systems and Medical Image Processing」では、まず現状の画像誘導手術における数種類の代表的な手術法を概観している。次に、医用画像処理における現状の要素技術を分類、整理している。

第3章「Overview of the Proposed Methods」では、まずFETOのための手術ナビゲーションのシステムの全体像を説明している。この全体像において、前述の3つの研究課題(1)～(3)がどのように位置づけられるかを説明した後、それぞれの課題を概観している。

第4章「Basic Technologies for Three Main Topics」では、前述の(a)～(c)の手法の提案と検討を以下のように行っている。

(a) 超音波画像やMRI (Magnetic Resonance Imaging) 画像の新たな領域分割法として、従来のカーネルベース・ファジーC-means法を改良した手法を提案している。ノイズが多く加わった状況でも従来法より良好な領域分割結果を得ている点は評価できる。

(b) 胎児の頭部と口に対応する楕円を検出するために、従来の反復的ランダム化ハフ変換を改良した方法を提案している。楕円の一部が遮蔽されている場合でも、従来法より高精度かつ高効率に楕円検出が行えることを実験的に示すという優れた成果を得ている。

(c) 高さの異なる円錐型の複数個の樹脂を超音波照射範囲に設置し、各円錐の頂点の絶対位置と画像中の位置とに基づき、超音波プローブを原点とする超音波座標系と、世界座標系や手術具等の局所座標系との変換行列を求める新たなキャリブレーション法を提案している。従来法より精度高く変換行列が得られることを示したことは評価できる。

第5章「3D Fetal Face Detection」では、前述の(1)の提案と検討を行っている。3次元超音波画像はノイズを多く含むので、3次元画像を構成する2次元のスライス画像ごとに(b)の楕円検出処理を施して胎児の頭部を抽出し、これに基づき顔の輪郭を求め、全てのスライス画像で求めた顔輪郭を統合して顔表面の3次元画像を得ている。次に、このようにして得られた3次元顔画像の局所的な曲率と幾何学的な関係を利用して、目、鼻、口等の顔パーツを検出している。胎児ファントムを用いた実験により高い精度で顔の表面と顔パーツが検出できることを示している。従来から顔検出の研究は数多く行われているが、胎児の顔を扱った研究はまだ少なく、胎児の顔の特徴点検出を行った例は見られない。新規性に富む手法を提案し、有効性の高い成果を得たことは高く評価できる。

第6章「Surgical Tool Location and Fetal Mouth Tracking」では、(2)の提案と検討を行っている。手術具は一行に並べられた15個の円筒形要素から構成されており、隣接する要素が回転可能なジ

ポイントで接続されている。まず、手術具全体の3次元スケルトンを求め、(c)のキャリブレーション法を用いて15個の要素の3次元座標を計算している。実験により、誤差がFETOの要求条件を満たす結果を得たことは評価できる。

胎児の口を追跡するために、まず内視鏡カメラにより獲得される動画像に対してHaar-like特徴を用いたAdaBoostアルゴリズムを施し、胎児の顔を検出している。次に、カラーヒストグラム特徴量に基づくCamShiftアルゴリズムを施して顔を追跡するとともに、(b)の楕円検出法により胎児の口を検出している。実験により実時間で正確に検出できることを示したのは評価できる。

第7章「Estimating the Position of the Fetal Trachea」では、(3)の提案と検討を行っている。まず、胎児ファントムの皮膚表面をレーザレンジファインダで3次元復元するとともに、気管等の内部構造は胎児の身体についての標準的な数値データを用いて設計し、胎児モデルを作成している。この胎児モデルの顔を、3次元超音波画像中の胎児の顔に重ね合わせている。この重ね合わせでは、まず顔の特徴点に基づく粗な重ね合わせを行った後に、顔表面を構成する点の集合に基づく密な重ね合わせを行っている。密な重ね合わせの結果における胎児モデルの気管の位置を、推定結果としている。実験により気管の位置の推定誤差がFETOの要求条件を満たすことを示したことは高く評価できる。

第8章「Conclusions and Future Work」では、各章の研究成果をまとめ、そこから結論を導き、今後の課題と展開について述べている。

以上、要するに本論文は、FETOのための手術具を胎児の口にナビゲートするために必要となる、3次元超音波画像からの胎児の顔の検出、手術具の検出、気管の位置の推定、および内視鏡画像からの胎児の口の検出を行う画像処理技術を提案し、有効性を検証したものである。本論文の成果はCDHだけでなく、様々な手術の画像ナビゲーションに活用されることが期待される。今後、画像処理だけでなく、医学、機械工学、ヒューマンインタフェース等の多くの研究分野における新たな学術的指針を本論文は示したもので、国際的な業績として高く評価でき、国際情報通信学の発展に寄与するところ極めて大きい。よって、本論文は博士（国際情報通信学）の学位を授与するに値するものと認める。

2014年4月10日

審査員：主任	早稲田大学教授	工学博士（東京大学）	大谷 淳
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	亀山 涉
	早稲田大学教授	博士（人間科学）（早稲田大学）	河合隆史
	奈良先端科学技術大学院大学教授		
		工学博士（大阪大学）	佐藤嘉伸