

厚生労働科学研究費補助金

身体機能解析・補助・代替機器開発研究事業

ハイリスク胎児の子宮内手術における
ナノインテリジェント技術デバイスの開発研究

平成18年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 千葉 敏雄

平成19（2007）年 4月9日

目 次

I. 総括研究報告	
ハイリスク胎児の子宮内手術におけるナノインテリジェント技術デバイスの開発研究	1
千葉敏雄	
II. 分担研究報告	
1. ハイリスク胎児の子宮内手術における多自由度屈曲鉗子マニピュレータの開発研究	4
土肥健純	
2. 術中・術後の胎児モニタリングのための体内型生理データ計測システムの開発	9
下山勲	
3. マイクロMRIを内視鏡先端に配置した術中ナビゲーションシステム	11
下山勲	
4. 双胎間輸血症候群手術支援を目的とする胎盤血管マッピングシステムの開発	15
佐久間一郎	
5. 手術ナビゲーションシステムにおける手術進捗度、危険領域等の効果的な情報提示方法の開発	19
伊関 洋	
6. 胎児外科手術支援ロボットの研究	24
藤江正克	
7. 三次元超音波画像誘導下低侵襲胎児治療用実験装置の開発	29
望月剛	
8. 細径三次元の多機能内視鏡開発とその子宮内手術ロボットへの搭載に関する研究	36
植田裕久	
9. 複合型光ファイバによるレーザー治療デバイスの開発	43
岡 潔	
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	54
IV. 研究成果の刊行物・別刷	

ハイリスク胎児の子宮内手術における ナノインテリジェント技術デバイスの開発研究

総括研究者 千葉敏雄 国立成育医療センター特殊診療部 部長

研究要旨 本研究は、ハイリスク胎児の子宮内手術を安全かつ確実なものとするこゝで、治療成績を飛躍的に向上せしめ、患児の長期 QOL の大幅な改善と医療費の低減を目的としている。我々は現在の技術的限界を超える低侵襲子宮内手術を実現するため、レーザ治療デバイス、子宮内手術支援デバイス、ナノ技術センサーデバイス、術中画像誘導支援システムの開発を行っている。本年度は、各種デバイスの小型化・高機能化・高精度化、並びに術中画像誘導支援システムとしての統合を進め、基礎評価実験にてその有効性を確認した。今後は、第2年度までに開発した各種デバイスを統合した手術システムを構築し、動物実験にてその実用性を検証する予定である。

分担研究者	
土肥健純	東京大学大学院情報理工学系研究科/教授
下山勲	東京大学大学院情報理工学系研究科/教授
佐久間一郎	東京大学新領域創成科学研究科/教授
伊関洋	東京女子医科大学大学院先端生命医科学研究所/教授
藤江正克	早稲田大学理工学部/教授
望月剛	アロカ株式会社研究所/主幹研究員
日高恒夫	ペンタックス株式会社インキュベーションセンター/ペンタックスフェロー
岡潔	独立行政法人日本原子力研究開発機構/研究副主幹

A. 研究目的

胎児外科手術とは、周産期死亡ないし生後の重篤な長期的障害のリスクが極めて高い異常が子宮内診断された場合に、その胎児自身あるいは胎盤・臍帯に対して何らかの外科的操作を加え、児の救命と長期的 QOL の改善をはかるための医療技術である。この手技としては、超音波ガイド下穿刺術、子宮切開を伴う直視下手術、内視鏡（胎児鏡）下手術が挙げられる。直視下手術には大きな侵襲と母体・胎児のリスクが伴うため、今後は低侵襲内視鏡（胎児鏡）下手術への移行が期待されている。しかし、胎児外科手術領域は比較的新しい分野ということもあり、極めて特異的な手術であるにも拘らず、専用に開発された技術・機器はほとんどこれまで存在していない。さらに、他の医療分野において開発された機器を転用する場合も、胎児手術という特殊な状況に対応できるものはいまだ少ないといえる。

そこで本研究では、現在の技術的限界を超える低侵襲子宮内手術を行うために、術者の身体機能を補助するための手術支援デバイス・手術支援システムの開発に取り組むことを目的とする。具体的には、双胎間輸血症候群(TTTS)のレーザ治療、胎児脊髄

膜瘤(MMC)修復術の低侵襲内視鏡手術手技改善・完遂を対象として、研究を進める。

B. 研究方法

B-1. レーザ治療デバイス

子宮内手術におけるレーザ治療では、子宮内に留置した内視鏡のチャンネルからレーザファイバを挿入し、例えば TTTS の治療においては胎盤吻合血管にレーザを照射・凝固する。対象部位は患者によって異なるが、レーザファイバの挿入位置は限られているため、子宮内でレーザ照射方向を自由に変えるデバイスが必要であった。そこでレーザファイバを搭載した上で屈曲が可能な、直径 2.4mm の屈曲マニピュレータ（屈曲半径 12.1mm）と直径 3.5mm の屈曲鉗子マニピュレータ（屈曲半径 4mm）を開発した。

また、より正確なレーザ照射のため開発した、レーザ照射機能と内視鏡機能を一体化した複合型光ファイバ（直径 2.2mm）の評価と、これに対する距離計測・血流計測機能の追加を行った。

B-2. 子宮内手術支援デバイス

MMC 修復術においては、露出した脊髄髄膜瘤表面にパッチをあてることで、患部を保護し、髄液漏出を防ぐ方法が有効とされている。そこでこのパッチをあてるための吻合デバイス、パッチを密着させるスタビライザ、パッチをあてる際の胎児の動きを保持する多関節屈曲のデバイスを開発した。また、パッチをあてる際には、脆弱な胎児皮膚に接触することになるため、胎児組織の特性評価を並行して進めた。

B-2. ナノ技術センサーデバイス

術中・術後の胎児モニタリングを行うため、胎児生理データ計測システムの要素技術として、マイクロファブリ・ペロー干渉計（Fabry-Perot Interferometer: FPI）を用いた分光カメラの研究を進

めた。Double Silicon On Insulator (DSOI) を用いることで、低電圧での駆動と製作プロセスの簡素化を実現した。さらに試作したマイクロ FPI と CCD カメラを組み合わせることで、分光カメラのプロトタイプを製作した。

B-4. 術中画像誘導支援システム

B-4-1. 三次元斜視内視鏡

内視鏡下手術では斜視内視鏡が高い頻度で用いられる。そこで三次元直視内視鏡として開発された技術を応用し、子宮内手術にも適用可能な細径の三次元斜視内視鏡を開発した。前年度に開発したレンズユニットを硬性鏡として組み込み、光学性能評価を進めた。

B-4-2. マイクロ MRI 搭載型内視鏡

従来の MRI では、体外に信号受信コイルを設置する必要があるが、将来の MRI 下手術を想定した場合には柔軟な手技の妨げとなる。そこで、マイクロ MRI を内視鏡の先端に配置した術中ナビゲーションシステム開発のため、MRI カテーテルの基礎的研究と平面型コイルを利用した高分解能 MRI 画像計測を進めた。

B-4-3. 画像誘導ナビゲーション

術中画像の超音波画像と内視鏡画像を用いて、術具操作の補助となる情報を術者に提示するナビゲーション技術を開発した。TTTS の治療においては、胎盤上の吻合血管をレーザーで凝固する治療法が有効とされる。そこで、より安全で効率的な手技を実現するため、内視鏡画像に含まれる歪みを補正した上で順次合成し、胎盤モデルの表面にマッピングするシステムを開発した。また、術具が胎盤や胎児に接触し、損傷してしまうことを避けるため、術具と患部の接近状態をリアルタイムに把握し、危険領域を提示・警告する近接覚ナビゲーションの開発を進めた。これらの技術には、胎盤や胎児の三次元位置・形状データが不可欠である。そこでリアルタイムで取得した 3 次元超音波データを、術具の座標系と同じ統合座標系で扱うための超音波ナビゲーションシステムの構築を進めた。

(倫理面への配慮)

本研究は、あくまでデバイスやシステムの開発を主体とするものであり、当面倫理面での問題はない。動物モデルを使用する場合は、国立成育医療センター動物管理委員会の定める規定に厳密に則って行われる。

C. 研究結果

C-1. レーザ治療デバイス

直径 2.4mm のレーザー搭載屈曲マニピュレータは、極めて高い位置決め再現性を有しており、また、ラットの腸間膜の焼灼実験では、90 度まで屈曲させた

状態であってもレーザー照射に支障がないことを確認した。直径 3.5mm のレーザー屈曲鉗子マニピュレータは、ファイバを搭載した状態で、-52.6~80.0 度まで屈曲でき、96.6%以上の高い伝達効率で水中のブタ肝臓ファントム表面の焼灼を行えた。複合型光ファイバスコープは、水中で 30W のレーザー照射を 300 回繰り返して行っても問題のない耐久性を有することを確認した。また、対象物までの距離と血流をリアルタイムに計測することが可能であり、in vivo 実験にてその有用性を確認した。

C-2. 子宮内手術支援デバイス

吻合デバイスについては、シリコンシートに配列し埋め込んだ細い固定用のピン角度を 90 度と 45 度の 2 種類に変え、胎児皮膚を模擬したシリコンに対して貼り付け・引っ張り試験を行った。ピンを 90 度とした場合に、より大きな力で貼りつくことが確認された。スタビライザについては、非常に小さな接触力において、誤差 3.5%の接触力推定が可能であった。胎児保持のための多関節屈曲デバイスは、1 関節辺り 1 度以下のばらつきに抑え、膨張させたバルーンで 500g までの外力付加に抗することができた。また、胎児組織の特性評価では、組織のモデリングにより脆弱な胎児組織が弾性・粘性共に小さいことが明らかとなった。

C-3. ナノ技術センサーデバイス

試作した FPI を用いてヒトの血液標本を観察した。血液は酸素飽和度によって透過する光の波長強度が異なるため、FPI により波長を選択的に CCD に入射させることで、静脈・動脈を強調して画像化した。

C-4. 術中画像誘導支援システム

C-4-1. 三次元斜視内視鏡

製作した斜視内視鏡の直径は 5.4mm であり、通常の 5mm トロッカーに問題なく挿入可能な細径化を行うことができた。視差角は目標値内であり、十分な立体感を得ることができた。

C-4-2. マイクロ MRI 搭載型内視鏡

MRI カテーテルの基礎的研究においては、油に浸した蓮根の断層画像の取得を行った。平面型コイルの先端部至近ではコイルと同程度の直径部分で MRI の信号強度が強く、明るい画像を得た。一方距離が離れると中心部で計測される信号強度が強く、明るい画像を得た。高分解能 MRI 画像計測においては、試作デバイスは医療用のコイルと比較しても高い感度を持つことを確認した。コイル直径が小さい場合、感度領域は狭くなるが、より高い S/N 比での計測が可能であった。

C-4-3. 画像誘導ナビゲーション

胎盤血管のマッピングシステムでは、内視鏡画像のキャリブレーションを行い、視野領域・光軸中心の自動取得を可能とした。また、位置・姿勢情報を用いて 3 次元胎盤マッピングを行い、全ての機能

H.知的財産権の出願・登録状況 分担研究報告書に記載

を1つのインタフェースにまとめることができた。近接覚ナビゲーションについては、超音波プローブ用マーカシステムの検討、超音波 Volume データの DICOM 連続スライス変換による PRS ナビゲーションへの対応、小型位置計測装置 Polaris Vicra を併用した PRS ナビゲーションの開発を行い、精度よく動作することを確認した。なお、システムの統合における超音波プローブの位置検出評価では 1.0mm 以内の誤差を確認し、エコーデータと内視鏡位置との座標系の統合・表示を実現した。

D.考察

本年度は、提案された各種デバイスの小型化・高機能化・高精度化、並びに術中画像誘導支援システムの開発を進めた。評価実験においては、個々の技術が有効に機能し、低侵襲子宮内手術を行うためのサイズや精度、安全性など、要求仕様を満たすことを確認した。今後は個々の技術の完成と、システム統合を進め、より実践的な臨床条件下での評価を行なう必要がある。

E.結論

本年度は、初年度に提案した子宮内手術支援システムを実現するため、レーザ治療デバイス、子宮内手術支援デバイス、ナノ技術センサーデバイス、術中画像誘導支援システムの開発を行った。また、各要素技術の評価実験を進め、完成度の向上に努めた。最終年度は、第2年度までに開発した各種デバイスを統合した手術システムを構築し、動物実験にてその実用性を検証する予定である。

F.健康危険情報

なし

G.研究発表

1.論文発表

(1)千葉敏雄、上岡克彦: 胎児閉塞性尿路疾患の周産期管理と治療 (3), 診断と治療社,2006

(2) 千葉敏雄: E X I T (Ex utero intrapartum treatment), 東京医学社,2006

その他は分担研究報告書に記載

2.学会発表

(1) 千葉敏雄、原田香奈子、藤崎正之、絵野沢伸、宮本隆司、土肥健純、下山 勲、佐久間一郎、伊関 洋、藤江正克、岡 潔、望月 剛、日高恒夫: 低侵襲胎児外科手術を対象としたデバイスの研究開発, 日本小児外科学会,秋田

(2) Chiba T,Yamashita H,Dohi T,:Feasibility study of 2-DOFs bending forceps manipulator for fetal surgery,IFMSS 2006 25th annual meeting,Hawaii,may 2006.

その他は分担研究報告書に記載

厚生労働科学研究費補助金(身体機能解析・補助・代替機器開発)
分担研究報告書

ハイリスク胎児の子宮内手術における多自由度屈曲鉗子マニピュレータの開発研究

分担研究者 土肥健純 東京大学大学院情報理工学系研究科 教授

研究要旨 本研究の目的は、双胎間輸血症候群や脊髄髄膜瘤といった先天的疾患に対する子宮内胎児外科手術に用いる高機能鉗子型デバイス群として、(1)子宮内において広範囲にわたる高精度レーザー照射を行うための屈曲鉗子システム、(2)子宮内において胎児背面にパッチシートを取り付けるための吻合デバイス、(3)子宮内において胎児を保持するための屈曲鉗子システム、以上3点の開発研究である。本年度の主な目的は、(1)子宮内においてレーザー照射鉗子を位置決めするためのデバイスの検討、(2)簡便に胎児背面に貼り付けることのできるパッチシートに関する検討、(3)羊水中の胎児を保持するためのデバイスの検討、である。

A. 研究目的

本研究の目的は、双胎間輸血症候群や脊髄髄膜瘤といった先天的疾患に対する子宮内胎児外科手術に用いる高機能鉗子型デバイス群の開発である。開発したデバイス群を用いて以下の処置を行うことを臨床的な目標としている。

- (A) 子宮内双胎間輸血症候群治療における胎盤吻合血管閉塞のためのレーザー照射
- (B) 子宮内胎児脊髄髄膜瘤治療における開口部の吻合

これらデバイスに求められる基本的な要求仕様として以下の3点があげられる。

- ・ 限られた開口部から治療対象部位にスムーズにアプローチするための多自由度化
- ・ 母体組織、特に子宮壁への損傷を低減するための細径化
- ・ 母体、胎児双方への損傷を回避するための高精度かつ安定した移動

これらの要求仕様を踏まえた上で、下記の3点を具体的な開発項目として設定し、開発のための基礎検討および試作機の製作を行った：

- (1) 子宮内において広範囲にわたる高精度レ

ーザ照射を行うための屈曲鉗子システムの開発

- (2) 子宮内において胎児背面にパッチシートを取り付けるための吻合デバイスの開発
- (3) 子宮内において胎児を保持するための屈曲鉗子システムの開発

B. 研究方法

B.1 子宮内において広範囲にわたる高精度レーザー照射を行うための屈曲鉗子システムの開発

昨年度、外径 3.5mm の多自由度屈曲鉗子 (Fig.1) を開発し、基本的な動作確認およびレーザー照射テストを行った。今年度は、上記テストの再試を行いつつ、マスタースレーブシステムによる安定した操作を目標として、鉗子位置決め操作用マニピュレータシステムの開発のための基礎検討をいった。具体的には、鉗子の方向を決定するための5節リンク機構に送りおよび軸周り回転の自由度を付加した4自由度のマニピュレータを開発した。

B.2 子宮内において胎児背面にパッチシートを

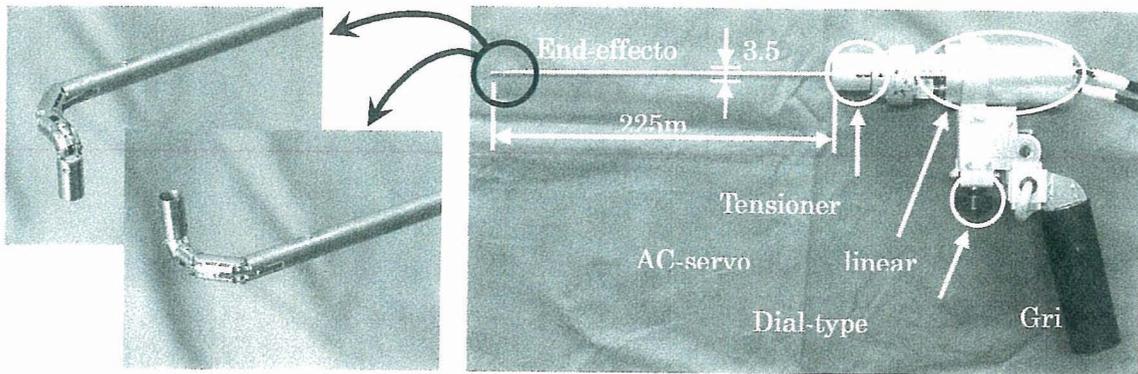


Fig.1 View of the 2-DOFs miniature manipulator of 3.5-mm diameter and tip's bending part manipulated by independent motions.

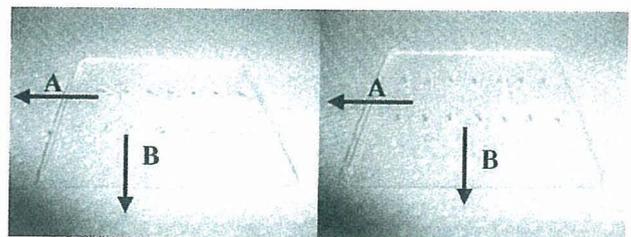
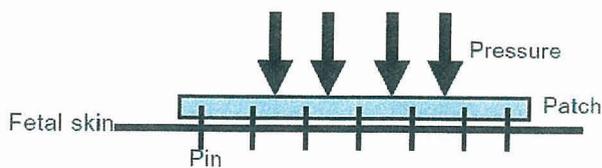


Fig.2 Silicon patch sheet with metallic pins attached in two different orientation patterns.

取り付けるための吻合デバイスの開発

週齢 20 数週の胎児の皮膚強度は低く、出生後治療の場合より一層の柔らかさを有する吻合手法が必要である。本研究では、脊髄髄膜瘤のために胎児体外へ露出した脊髄を被覆保護するため、生体適合素材からなるパッチシートを胎児背面の開口部に貼り付ける手法を考え、シート貼り付け方法とそれを実現するためのデバイスの開発検討を行っている。今年度は、簡便なパッチシート貼り付け方法を検討するため、シリコンシートに金属ピンを取り付け (Fig.2), 貼り付け強度等について検討した。

B.3 子宮内において胎児を保持するための屈曲鉗子システムの開発

子宮内において胎児は羊水中に浮遊するような状態であり、機械的な切開や穿刺、縫合、パッチシートの貼り付け等、接触を伴う処置を行う場合には胎児が移動しないよう保持し、安定性を確保することが必要である。そこで本研究では、子宮内胎児脊髄髄膜瘤治療において胎児背面から

外力が加わることを想定し、経皮的に多関節屈曲鉗子型デバイスを挿入して胎児腹面側に平面を作り保持する方法を検討している。今年度はバルーンを周囲に取り付けたプロトタイプを試作し基本的な評価実験を行った。

C. 研究結果

C.1 子宮内において広範囲にわたる高精度レーザー照射を行うための屈曲鉗子システムの開発

マニピュレータ内部のチャンネルにレーザー照射用ファイバを搭載した状態では最小屈曲半径 4mm で最大 52.6~80.0° の屈曲範囲を有し、96.6%以上の高い伝達効率で、水中に留置した動物肉ファントムを内視鏡下でレーザー焼灼できた (Fig.3)。また、胎児脊髄髄膜瘤の治療を目的とし、ワイヤ駆動式把持鉗子ユニットの搭載をした状態では最大-62.7~88.2° の広い屈曲範囲有し、最大屈曲発生力 3.91 N (398 gf), 最大把持力 3.48 N (355 gf) であり子宮内での処置に十分な大きさの力の発生が確認できた。

上記鉗子位置決めのためのマニピュレータの

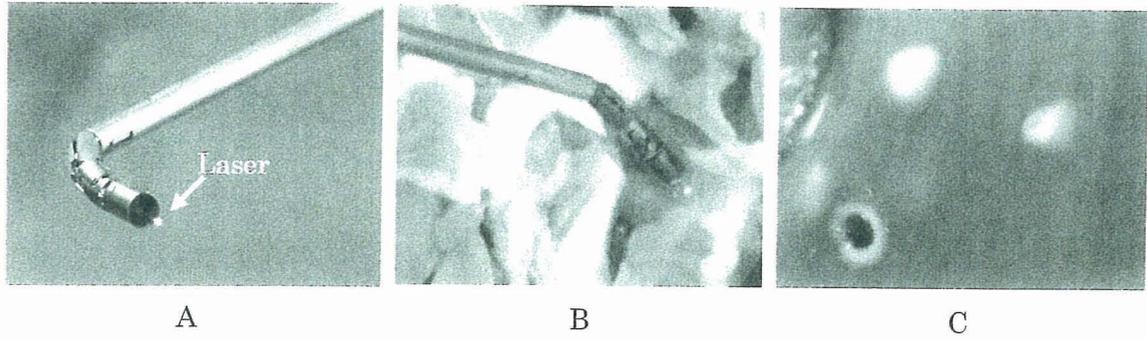


Fig.3 A is manipulator with Nd:YAG laser fiber bended toward 66 degrees.
B is laser photocoagulation of phantom model of placenta (boneless chicken

精度については、移動方向を変化させた場合は伝達機構において改善すべきバックラッシュが生じたが、移動方向を固定した場合は 1 mm, 1 deg 以下のバラ付きであった。

C.2 子宮内において胎児背面にパッチシートを取り付けるための吻合デバイスの開発

固定用金属ピンの取り付け角度をシリコンシート表面に対し 90 deg, 45 deg とし、胎児皮膚を模擬した別のシリコンシートの貼り付けすべり方向（シート表面方向）に関する引っ張り試験を行った。金属ピンの取り付け角 45 deg の場合の方が 90 deg の場合よりもシートを剥がすために要する力が小さい傾向にあった。

C.3 子宮内において胎児を保持するための屈曲鉗子システムの開発

胎児を保持するためデバイスにより作られる保持面の位置や形状を左右する屈曲角については各関節において 1 deg 以下のバラ付きであった。バルーンが膨張状態を保ったまま胎児を保持できる外力負荷は 500 gf 以上であった。

D. 考察

D.1 子宮内において広範囲にわたる高精度レーザー照射を行うための屈曲鉗子システムの開発

屈曲鉗子自体については、屈曲角が内蔵したレーザー伝達用ファイバの変形反力により多少低下したものの十分量を確保しており、屈曲させなが

らのレーザー照射により水中ある動物肉ファントムを変性凝固させることが実現できた。

鉗子位置決めのためのマニピュレータに関しては、駆動力伝達部におけるバックラッシュ（遊び）が现阶段では無視できず改善の余地があるが、鉗子の移動方向を固定した場合は繰り返し誤差が十分小さく、胎盤上の血管走行状態に応じたマニピュレータの駆動パターンに応じて駆動量を調整することで十分な位置決め精度を確保できる可能性がある。今後検討を行う。

D.2 子宮内において胎児背面にパッチシートを取り付けるための吻合デバイスの開発

脊髄髄膜瘤により生じた胎児背面開口部を開じるためのパッチシートを胎児背面に固定するための金属ピンは固定力（貼り付け力）を左右することが確認された。しかしながら、パッチシートには基本的に「固定しやすく剥がれにくい」という性質が求められるため、ピンの形状や取り付け方にはトレードオフをなす複数の条件が存在するものと予測され、今後さらなる検討が必要である。また、パッチシートには、胎児移動により羊水から受ける外力や露出しようとする脊髄に抗して胎児背面に貼り付け強度が必要である。今回行った引っ張り試験では表面方向の引き剥がし力を想定したが、胎児側からの突き上げ力や表面方向の水流等を模擬した評価実験が必要であると考えられる。

D.3 子宮内において胎児を保持するための屈曲鉗子システムの開発

保持用デバイスの屈曲のためのワイヤ伝達機構においてバックラッシュ（遊び）が生じたが、胎児保持に十分な大きさや形状を持った保持平面を作るだけの屈曲は実現できている。したがって、屈曲操作については術者による扱いやすさの評価が今後必要な検討事項である。保持力については500 gfを実現しており、強度の低い胎児器官・組織に対して処置をすることを想定すると十分な保持力と言える。デバイスに取り付けられたバルーン形状を含め保持の仕方や、操作用インターフェイスの検討を今後行う。

E. 結論

子宮内において広範囲にわたる高精度レーザー照射を行うための屈曲鉗子システムについては、レーザー照射鉗子自体は水中での動物肉凝固も成功しほぼ技術的に完成しつつある。今後は鉗子位置決め精度やマニピュレーション計画についての検討が必要である。

子宮内において胎児背面にパッチシートを取り付けるための吻合デバイスについては、パッチシートへの固定用金属ピンの取り付けが貼り付け強度に影響を与えることが分かった。貼り付け強度以外の評価項目の検討も含め検討が必要である。

子宮内において胎児を保持するための屈曲鉗子システムについては、開発した保持デバイスのプロトタイプが処置時に生じる反力に抗するだけの十分な胎児保持力を有することが示された。今後、胎児保持の仕方やデバイス操作インターフェイスの検討を行う。

F. 健康危険情報

総括研究報告書に記載

G. 研究発表

G.1 論文発表

(1) 廖洪恩, 鈴木宏和, 松宮潔, 正宗賢, 土肥健

純, 千葉敏雄: 内視鏡下胎児手術における柔支持マニピュレータの研究; 生体医工学, Vol.44 No.4, 2006.

G.2 学会発表

- (1) Toshio Chiba, K.Harada, T.Fukuyo, H.Yamashita, K.Masamune, M.Fujie, T.Dohi: New Hands and Eyes for Advanced Fetal/Pediatric Endoscopic Surgery, 20th Congress of Asian Association of Pediatric Surgeons(AAPS) With WOFAPS Executive Meet, p.265, November 12-15, 2006
- (2) Hongen Liao, Hirokazu Suzuki, Kiyoshi Matsumiya, Ken Masamune, Takeyoshi Dohi, Toshio Chiba: Fetus Support Manipulator with Flexible Balloon-based Stabilizer for Endoscopic Intrauterine Surgery, 9th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention --MICCAI 2006, LNCS 4190, pp.412-419, Copenhagen, Denmark, Oct. 2006.
- (3) 千葉敏雄, 山下紘正, 福与恒雄, 正宗賢, 佐久間一郎, 土肥健純: 低侵襲子宮内手術のための3D構成内視鏡と細径ロボット鉗子, 第4回日本胎児治療学会抄録集, pp27, 浜松, Oct, 2006
- (4) 廖洪恩, 鈴木宏和, 松宮潔, 正宗賢, 土肥健純, 千葉敏雄: 胎児内視鏡下手術における柔支持マニピュレータの研究; 生体医工学シンポジウム2006, pp.91, 2006年9月.
- (5) Yamashita H, Matsumiya K, Masamune K, Liao H, Chiba T, Dohi T: Two-DOFs bending forceps manipulator of 3.5-mm diameter for intrauterine fetus surgery: feasibility evaluation, Proceedings of 20th International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery

(CARS2006), Osaka, Japan. June 28- July 1, 2006. pp.218-220.

- (6) Chiba T, Yamashita H, Dohi, T. Feasibility study of 2-DOFs bending forceps manipulator for fetal surgery, IFMSS 2006 25th annual meeting, Hawaii, May 2006

H. 知的財産権の出願・登録状況

該当なし.

研究要旨

平成 18 年度は、術中・術後の胎児モニタリングのための体内型生理データ計測システムの開発において、その要素技術となるマイクロファブリ・ペロー干渉計 (FPI: Fabry-Perot Interferometer) を用いた分光カメラの研究を進めた。マイクロFPIを用いた分光カメラの研究では、DSOI (Double Silicon On Insulator) を利用することにより、低電圧での駆動・プロセスの簡略化を実現した。さらに、試作したマイクロFPIとCCDカメラを組み合わせ、分光カメラのプロトタイプを実現した。

A. 研究目的

術中・術後の胎児モニタリングのための生理データ計測データ計測システムの要素技術として、マイクロファブリ・ペロー干渉計 (FPI: Fabry-Perot Interferometer) を用いた分光カメラの研究を行った。ファブリ・ペロー干渉計は、2 枚の半透過ミラーの間隔を光の波長と同程度にすることによって、波長選択性の高い分光フィルタとなる。このミラー間隔をMEMS技術 (Micro Electro Mechanical Systems) によって、ナノオーダーで変化させることにより、可変波長光フィルタを実現する。ここで、近赤外線の光源と、この分光フィルタを利用することによって血液の観察を行い、動脈血酸素飽和度の計測を行うことが本研究の目標である。

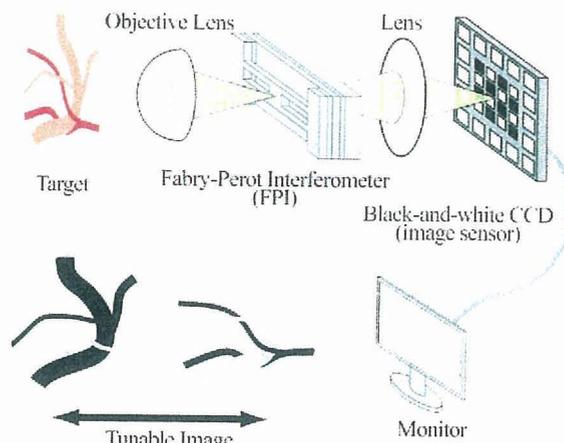


Figure 1 分光カメラの概略図

B. 研究方法

本研究で利用するマイクロファブリ・ペロー干渉計に関しては、既に MEMS 技術を利用することによって 2 mm×2 mm の大きさでの試作を実現している。しかし、製作プロセスが複雑であり、収率が低く、駆動電圧が非常に高いという問題を持っていた。そこで本研究では、Double Silicon On Insulator (以下 DSOI) を用いることで比較的容易なプロセスでファブリ・ペロー干渉計を実現する。さらに、CCD カメラと組み合わせ、近赤外領域に感度を持つカメラを試作し、特定の波長域のみを観察する。

このデバイスの概略図を Fig. 1 に示す。この分光カメラでは、外部から近赤外線を含む白色光源を照射し、体組織や血液を透過した光を、マイクロファブリ・ペロー干渉で分光し、CCD カメラによって 2 次元画像情報として体内情報の取得を行うものである。血液では、その酸素飽和度に依って透過・吸収する光の波長が異なるので、その違いを画像で確認できるカメラによって術中・術後の生理状態を確認するデバイスを実現することができる。

試作した FPI の試作プロセスを Fig. 2 に示す。試作した FPI は、まず DSOI 表面を DRIE 装置でエッチングして、FPI の可動部を製作する。干渉計を構成するミラー部分は 80 μm×80 μm、ミラー部分を支持する 4 本の梁は幅 25 μm、長さ 500 μm とした。次に DSOI の支持層の裏側から 100 μm×100 μm の穴を DRIE によるエッチングで形成し、ウェハの裏側から干渉光が透過できるようにした。

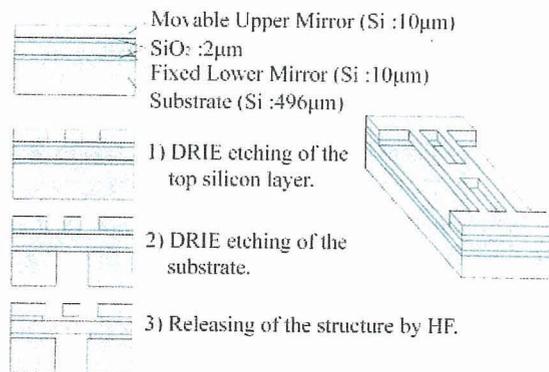


Figure 2 DSOI を利用した FPI の試作プロセス

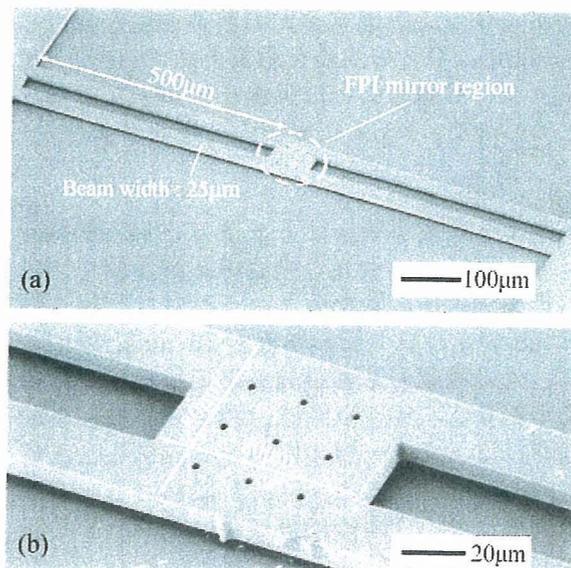


Figure 3 試作した FPI の電子顕微鏡写真

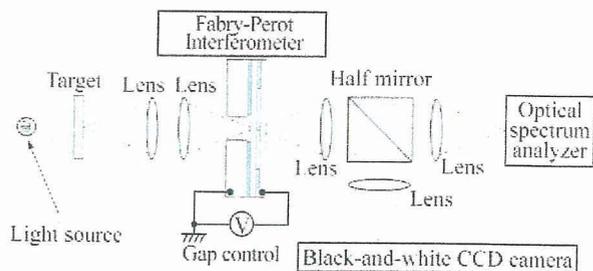


Figure 4 特性計測実験セットアップ概略

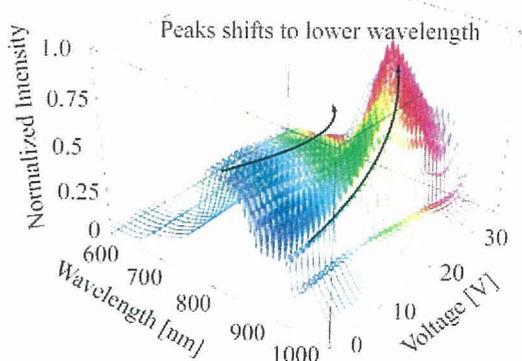


Figure 5 印加電圧と透過光スペクトル変化

最後に FPI の可動部を支えているガラス層を HF 蒸気でエッチングし、構造をリリースした。試作した FPI の電子顕微鏡写真を Fig. 3 に示す。

(倫理面への配慮) 関連する研究項目はない。

C. 研究結果

試作した FPI の特性を計測するために Fig. 4 に示す実験セットアップを構成した。この実験セットアップを利用し、FPI に 0~30 V の電圧を印加した際の透過光スペクトルの特性変化を計測した。Fig. 5 が特性計測実験の結果であるが、印加電圧を上昇させることで、2 枚のミラー間の距離が短くなり、透過光スペクトルのピークが短い波長へとシフトしていることが確認できた。次に試作した FPI を通し、人間の血液標本を観察した。血液は、その部分での酸素飽和度に従って透過する光の波長強度が異なる。そこで、FPI によりその波長を選択的に CCD に入射させることで、静脈あるいは動脈を強調して画像化することを行った。Fig. 6 に実験の結果を示す。

D. 考察

試作した FPI の光学特性を Fig. 5 において計測したが、ミラー部における光の吸収の影響が強くなってしまい、波長選択性が低かった。これは、試作に利用した DSOI のシリコン層の厚みが 10 μm と厚かったために、光の吸収の影響が強くなってしまったためだと考えられる。次年度以降は、利用する波長領域に最適なシリコンミラー層の厚みを設計することで、光学特性向上を行う。また、Fig. 5 における血液標本の観察結果だが、今回の結果においてはその濃淡に顕著な違いは生じなかった。

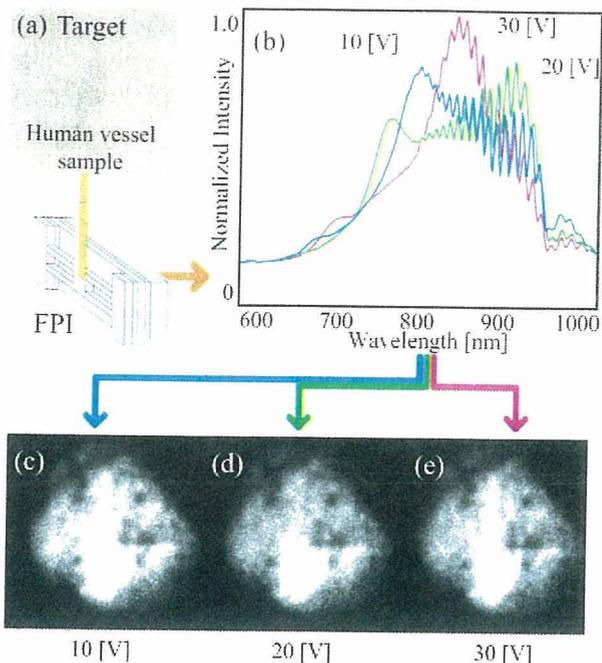


Figure 6 FPI の分光特性と取得画像

これは、FPI のミラー部が厚く、光の吸収が大きかったこと、及び、今回利用した波長 650~950 nm における光源の強度と CCD の感度が低かったことが原因だと考えられる。

E. 結論

以上より、これまでマイクロファブリ・ペロー干渉計を利用した分光カメラの試作とその原理検証を実現した。しかし、生理データ計測デバイスとしての特性は不十分であったため、次年度以降はデバイスの特性向上を進め、生理データ計測を実現してゆく予定である。

F. 健康危険情報

総括研究報告書にまとめて記載。

G. 研究発表

1. 論文発表：
 - [1] T. Dohi, I. Shimoyama, "Micro Monitor of the Blood," The Japan Journal, Vol. 3, No. 11, pp. 27, March, 2007.
2. 学会発表：
 - [2] 高河原和彦, 星野一憲, 松本潔, 下山勲, "反射光強度による動脈血酸素飽和度計測の研究," ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006, 東京, May 26-28, 1A1-A19, 2006.

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得：特になし
2. 実用新案登録：特になし
3. その他：特になし

マイクロMRIを内視鏡先端に配置した術中ナビゲーションシステム

分担研究者 下山 勲（東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授）

研究要旨

平成 18 年度は、マイクロMRIを内視鏡に配置した術中ナビゲーションシステムの基礎研究として、①平面型コイルを用いたMRIカテーテルの基礎的研究、および、②平面型コイルを利用した高分解能MRI画像計測の研究を進めてきた。①平面型コイルを用いたMRIカテーテルの研究では、直径 36 mmの亚克力パイプの先端にコイルを配置し、MRI信号の受信回路をパイプ内部に配置したMRI信号受信部を実現した。さらに、このデバイスをMRIに接続し、蓮根の断層画像の取得を行った。②平面型コイルを利用した高分解能MRI画像計測では、①で行った平面型コイルをさらに微小化、高感度化を進め、直径 20 mm, 5 mmの平面型コイルを試作し、亚克力パイプ先端に取り付け、MRI画像の取得を行った。

①平面型コイルを用いた MRI カテーテルの基礎的研究

A. 研究目的

本年度は、マイクロMRIを内視鏡に配置した術中ナビゲーションシステムの基礎研究として、円筒形の先端部にMRI用受信コイルを配置したプローブ型受信デバイスの実現を目的として研究を進めた。また、円筒形デバイスの内部にMRI信号を受信するための回路を配置した構成とすることで、内視鏡による画像取得やカテーテルによる作業と同時にMRI画像取得ができるデバイスとすることを目的とした。

B. 研究方法

内視鏡あるいはカテーテルを模擬したものとして、 $\phi 36$ mmの亚克力パイプを利用した。この亚克力パイプの先端部にMRI信号受信用プレーナコイルを配置し、亚克力パイプ内部に信号受信用電子回路を配置した。試作したデバイスの写真をFig. 1 に示す。Fig. 2 は、プローブ型受信デバイスを医療用MRIへと接続するための構成を示す。電子回路は、受信部のインピーダンス及び周波数を調整するための可変コンデンサと、励起パルスから受信回路を保護するための保護回路で構成されている。

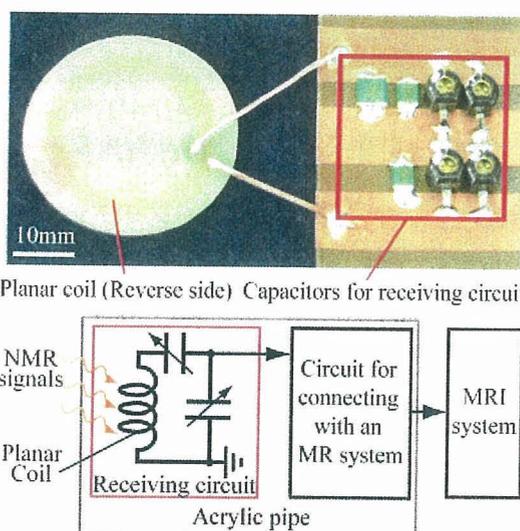


Figure 2 プローブ型デバイスのMRIへの接続

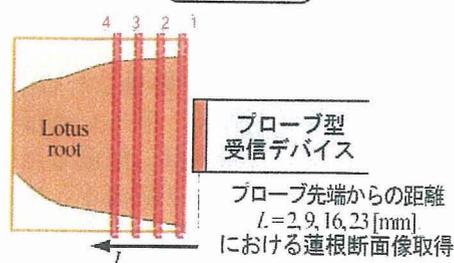
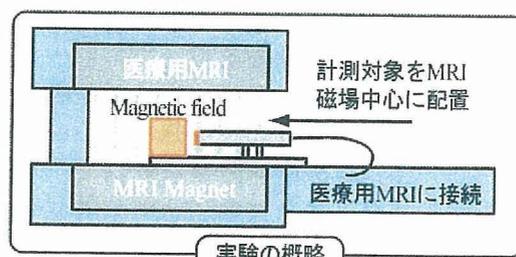


Figure 3 プローブ型受信デバイスによるMRI画像取得実験

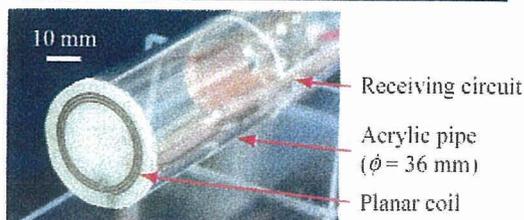
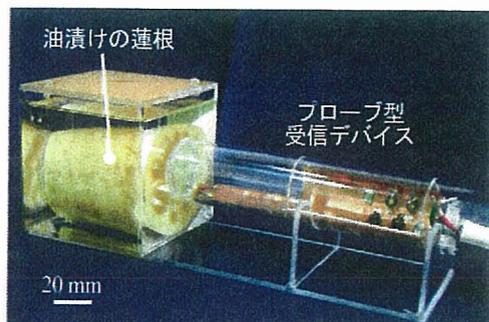


Figure 1 試作したプローブ型受信デバイス

このデバイス进行评估するために、医療用MRIへと接続し、80×80×80 mmの亚克力箱の内部に置いた、油漬けにした蓮根の断層画像取得を行った。この際、計測対象である亚克力箱がMRIの中心となるように配置し、計測対象の中心とプローブ型受信デバイスの中心が同一となるように設置した。

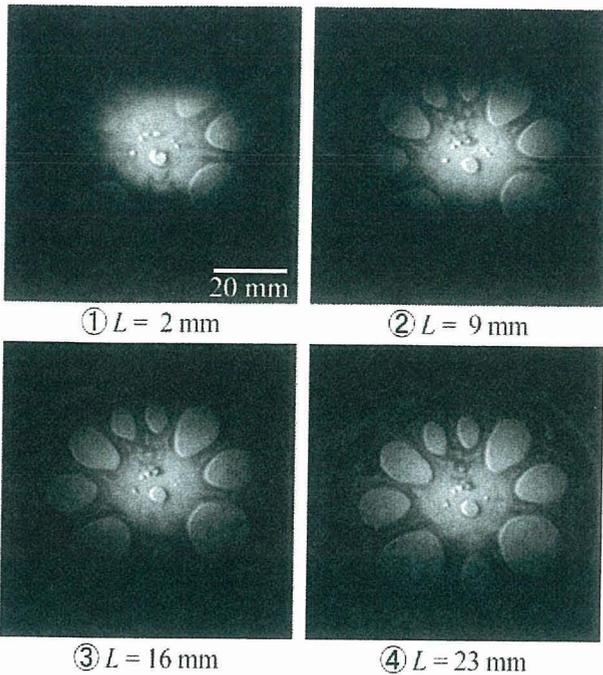


Figure 4 計測された蓮根の断層画像

この状態で、プローブ型受信デバイスの先端部からの距離 $L = 2, 9, 16, 23$ mmにおける断層像を計測し、取得した画像からデバイスの評価を行った。

(倫理面への配慮) 関連する研究項目はない。

C. 研究結果

Fig. 3にプローブ型受信デバイスによるMRI画像取得実験の概略を示す。画像取得は、スピンエコー法を用い、FOV 120×120 mmを 256×256 分割で測定し、スライス厚 3 mm、TR = 420 msec、TE = 24 msecの条件で行った。Fig. 4は、上記の条件で取得したMRI画像である。取得画像より、プレーナコイルの先端部に近い場所においては、コイルと同程度の直径の部分で、MRIの信号強度が強く明るい画像となっている。また、距離が離れるに従って、外縁部の画像も明るくなってきているが、中心部で計測される信号強度が強く、明るい画像となっている。

D. 考察

プローブ型受信デバイスにより撮像したMRI画像は、画像中心部の信号強度が強く、明るい画像となっていた。これは、プローブ先端部に配置した平面型コイルに対して、平面型コイルを断面とした半球状の領域で高い感度を持っていたためだと考えられる。MRIにおいては、感度が高く、高S/N比での画像取得を実現した部位では、原理的に分解能の向上が見込める。そのため、明るい画像を取得できたプローブ先端部の近傍に領域を限定することによって、従来のMRIと比較してより詳細なMRI画像を取得できる可能性を示すことができたと言える。

一方、MRIの取得画像はプローブからの距離が離れるに従って外縁部の画像も観察することができた。

これは、プローブ先端部から距離が離れることにより、プローブの感度が低くなったためだと考えられる。そのため、全体的にノイズ成分が強くなっており、S/N比が低下してしまっている。しかし、コイルの感度が低下している部分からもMRI画像の取得が可能であることが確認できた。これより、プローブ型受信デバイスでは、領域を限定した高感度・高分解能画像計測と、感度が低いものの広い領域を対象とした画像計測を行うことができることがわかった。

E. 結論

プローブ型受信デバイスを医療用MRIに接続することによって、蓮根の断層MRI画像の取得を実現した。取得したMRI画像は、プローブ先端部の近傍で感度が高く、高いS/N比を持つことが分かった。また、プローブ先端部からの距離が離れた部位でもMRI画像が取得できることを確認した。これより、コイル感度の補正を行うことで、広範囲のMRI画像取得と、計測領域をデバイス先端部に限定することによる高分解能画像取得を行うことができた可能性を示すことができた。

F. 健康危険情報

総括研究報告書にまとめて記載。

G. 研究発表

1. 論文発表：特になし
2. 学会発表：
 - [1] 桑名健太, 土肥徹次, 松本潔, 下山勲, “マイクロ平面コイルを用いたカテーテル型MRI受信デバイス,” 第24回日本ロボット学会学術講演会, 岡山, Sep. 14-16, 3J22, 2006.

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得：特になし
2. 実用新案登録：特になし
3. その他：特になし

②平面型コイルを利用した高分解能MRI画像計測

A. 研究目的

従来のMRIでは、MRI信号の受信には体外に配置したコイルを利用して行ってきた。これに対し、本研究では計測したい領域を微小な領域に限定し、計測領域に応じたサイズの受信部を計測領域直近に配置することによって、飛躍的なS/N比の向上が見込め、限られた範囲ではあるが高分解能なMRI画像取得ができる。そこで、内視鏡先端部にMRI信号受信部を配置し、計測したい患部直近まで受信部を近づけるデバイスの実現を目標とする。そのために、これまでに試作した平面型コイルを用いたカテーテル型デバイスの小型化及び高感度化を目的として研究を進めた。

B. 研究方法

平面型コイルとして、直径 5 mm および 20 mm のコイルを試作した。試作プロセスを Fig. 5 に示す。MRI 中の磁場を乱さないために、MR 対応の材料を中心に試作した。本研究では、静磁場強度 0.2 T の MRI を利用した実験を行うために、試作したコイルは約 1.0 μH のインダクタンスを目標に試作した。試作したコイルをアクリルパイプの先端に配置した MRI 信号受信デバイスの写真を Fig. 6 に示す。このアクリルパイプ内部に、MRI 信号受信電子回路を配置し、受信部のインピーダンス及び周波数を調整する。

試作したデバイスを MRI に接続し、ファントムを用いた感度計測実験と、画像計測実験を行うことによって、試作デバイスの評価を行う。試作デバイスは、Fig. 7 に示す治具を利用し、計測対象およびコイル中心が MRI の磁場中心と一致するように調節可能とした。

(倫理面への配慮) 関連する研究項目はない。

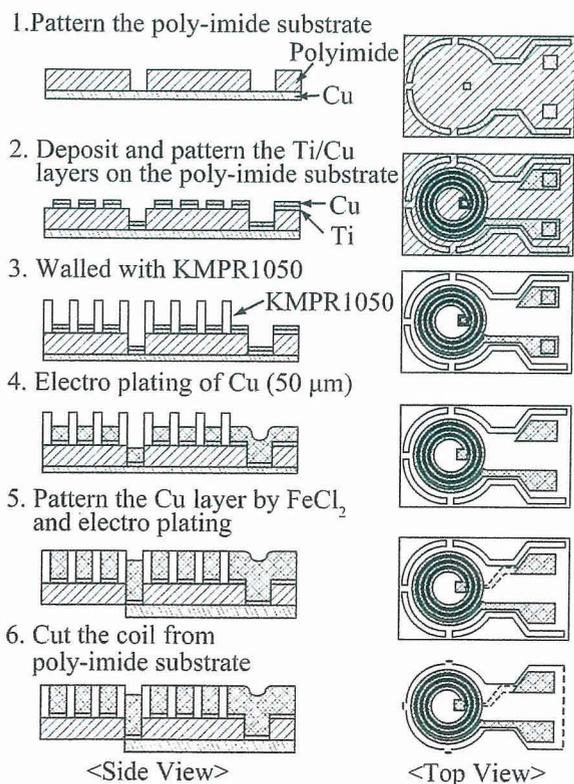


Figure 5 製作プロセス

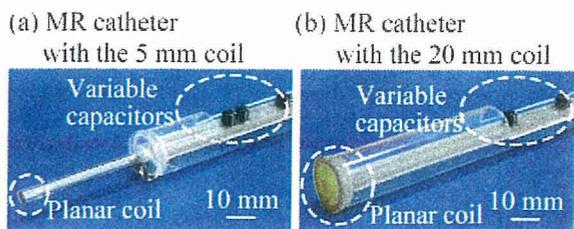


Figure 6 試作した平面型コイルを利用したカテーテル型デバイス

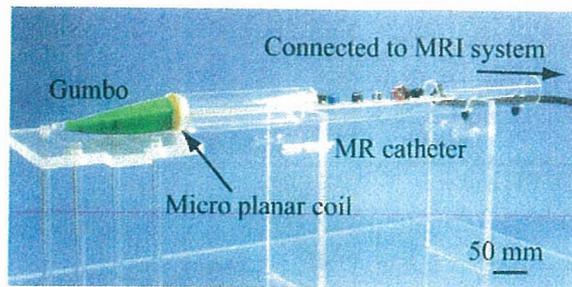


Figure 7 実験セットアップ

Table 1 SNRs of MR images of the phantom.

	2.0×2.0×2.0 mm ³	0.5×0.5×1.0 mm ³
	resolution	resolution
Medical coil	30	3.7
5 mm coil	259	28
20 mm coil	264	13

C. 研究結果

試作したデバイスの S/N 比計測を行った結果を表 1 に示す。S/N 比計測のための撮像条件としてスピンエコー法を用い、TR が 250 ms、TE が 22 ms とした。リピートカウントは全て 16 回である。なお、解像度は 2.0×2.0×2.0 mm³ 及び 0.5×0.5×1.0 mm³ の条件で撮像を行った。また、従来の MRI に用いる膝用コイルを比較のために利用し、参考値としての計測を行った。

実験の結果、試作デバイスはコイル近傍に感度領域が限定されており、医療用コイルと比較して、3 倍から 8 倍の S/N 比を持つことを確認した。

さらに、高解像度の MR 画像の取得実験として、オクラの MR 画像を撮像した。撮像条件は S/N 比計測時の条件と同じである。取得したオクラの MR 画像を Fig 8 に示す。解像度 2.0×2.0×2.0 mm³ においては、どのコイルにおいても計測対象の経常観察が可能であった。しかし解像度が低いため、オクラの種とそのまわりの区別がつかない。解像度 0.5×0.5×1.0 mm³ においては、医療用コイルの場合 S/N 比が低いため、鮮明な画像が得られなかった。一方、試作したデバイスで撮像した場合には、オクラの構造を詳細に画像化することが可能であった。また高解像度であるため、オクラの種を 1 つ 1 つ区別することが可能であった。

D. 考察

S/N 比計測実験の結果、試作デバイスは医療用コイルと比較して、高い感度を持つことが確認できた。この際、コイル直径が 5 mm のものは、直径 20 mm のコイルに比べ、感度領域は狭いが、より高い S/N 比での計測が可能であることが示された。さらに撮像実験においては、コイル直径が 5 mm の場合には、コイルの感度領域が小さいため、全体像の確認は困難であった。しかし、感度領域が狭いため、逆に S/N 比が高く、より高解像度での撮像が期待できることがわかった。

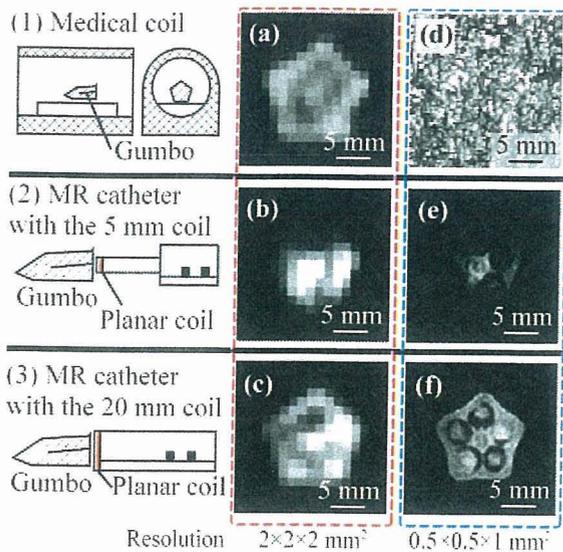


Figure 8 取得したMRI画像

E. 結論

本研究では MEMS プロセスによって平面型コイルを試作し、高感度な MRI 信号受信デバイスを試作した。平面型コイルは、インダクタンスが $1.0 \mu\text{H}$ になるように設計し、試作を行った。試作デバイスの感度領域は、コイル近傍に限定されてしまうが、通常の医療用コイルと比較して、3 倍から 8 倍の S/N 比を持った画像計測が可能であることを確認した。さらに、試作デバイスによる撮像実験により、医療用コイルでは観察が困難であった解像度 $0.5 \times 0.5 \times 1.0 \text{ mm}^3$ の解像度でオクラの画像取得を実現した。

F. 健康危険情報

総括研究報告書にまとめて記載。

G. 研究発表

1. 論文発表：特になし
 2. 学会発表：
- [1] Hidetoshi Takahashi, Tetsuji Dohi, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama, "A micro planar coil for local high resolution magnetic resonance imaging," The 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Kobe, Japan, Jan. 21-25, 2007.

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得：特になし
2. 実用新案登録：特になし
3. その他：特になし

双胎間輸血症候群手術支援を目的とする胎盤血管マッピングシステムの開発

分担研究者 佐久間 一郎 東京大学大学院 教授

研究要旨： 双胎間輸血症候群の治療においては吻合血管の見落としは重要な問題となっている。この疾患に対する低侵襲な治療法として注目されている一つにレーザー焼灼療法がある。この治療法では、医師が内視鏡で胎盤表面を観察し、視診にて吻合血管の同定を行い、病変部位をレーザーで焼灼し、不均衡な血流を遮断させる。今年度は、双胎間輸血症候群の治療であるレーザー焼灼術の効率性・安全性を向上させるために、胎盤表面のマッピングシステムを開発した。具体的には、まず内視鏡画像に入った歪みのパターンを測定し、画像の歪みを補正された。次に、撮影した全ての画像を1つの平面上に投影し、合成画像を作成された。画像の視野領域・光軸中心を自動的に取得するシステムを開発し、自動的な画像歪みを補正し、また内視鏡と胎盤の3次元位置情報を記録し、画像を胎盤表面にマッピングさせた。全てのシステムを1つのユーザーインターフェースに載せることで、システムを容易に操作できることを確認した。

A. 研究目的

双胎間輸血症候群（TTTS）は一卵性双胎にのみ起こり、双胎児の胎盤血管が吻合することにより双子の間で血液の不均衡が生じるようになるという疾患である。現在、この疾患に対する低侵襲な治療法として注目されている一つにレーザー焼灼療法がある。この治療法では、医師が内視鏡で胎盤表面を観察し、視診にて吻合血管の同定を行う。吻合血管と見なされた部位が見つければ、その部位をレーザーで焼灼し、不均衡な血流を遮断させる。

しかし、内視鏡の局所的な視野により観察できる範囲が非常に小さくなる。そこで、吻合血管の同定に必要とする胎盤上の全体的な血管系を把握することは医師の記憶にしか頼らない。このような原因で吻合血管を見落とす可能性があり、医師の負担も大きくなるという問題がある。

そこで、本研究では双胎間輸血症候群の治療であるレーザー焼灼術の効率性・安全性を向上させるために、胎盤表面のマッピングシステムを開発する。このシステムの実現として、先行研究では内視鏡で撮影した局所的な画像から広域的な2次元画像を作成する研究が行われてきた。具体的には、まず内視鏡画像に入った歪みのパターンを測定し、画像の歪みを補正された。次に、撮影した全ての画像を1つの平面上に投影し、合成画像を作成された。

しかし、先行研究では、内視鏡の鏡筒を交換したことで画像の視野領域が変動する場合、光軸点の測定を毎回手動で繰り返す必要がある。これは臨床現場において不適切なことである。また、2次元合成画像では、空間内の座標が記録されないため、画像上で吻合血管を同定できたとしても、その場所に辿りつけない状態となる。

先行研究の改良として、画像の視野領域・光軸中心を自動的に取得するシステムを開発し、自動的な画像歪みの補正を実現する。また、内視鏡と胎盤の3次元位置情報を記録し、画像を胎盤表面にマッピングさせる。全てのシステムを1つのユーザーインターフェースに載せることで、システムを容易に操作できるようになる。

B. 研究方法

開発する胎盤血管マッピングシステムを図1に示す。システムは大きく分けて4つの要素に構成される。それらは、画像を撮影する内視鏡、胎盤形状を取得する超音波装置、位置・姿勢情報を記録する位置計測装置、全てのデータを処理するコンピュータということである。

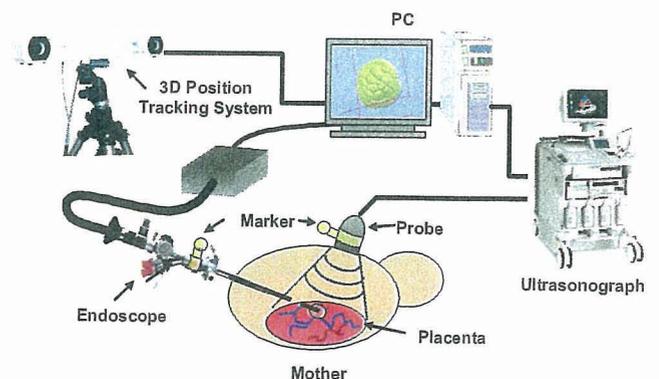


図1 システムの構成

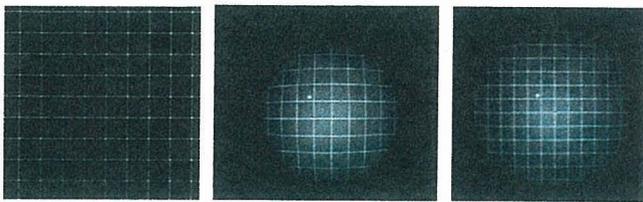
システムの流れとして、まず内視鏡で画像を撮影すると同時に内視鏡と胎盤の位置・姿勢情報を記録する。次に、画像から視野領域を抽出し、光軸点を求めることで、画像の歪みを補正する。また、超音波装置で胎盤形状を取得し、その表面モデルを作成

する。更に、記録した位置・姿勢を用い、画像を胎盤表面モデルにマッピングする。ただし、マッピングを行うために、内視鏡の焦点距離が必要とされる。焦点距離は内視鏡のレンズに対して同じ値となるので、内視鏡のキャリブレーションでこれを予め求めると良い。本研究では、具体的に下記の要素技術の開発を行った。

1) 光軸中心と視野領域の関係

レーザを内視鏡の光軸に合わせれば、画像上では光軸点が写る。また、以後説明する視野領域の抽出手法で求めた視野中心と光軸中心との位置ずれは2つの位置関係となる。この位置関係を用い、次に述べる視野領域自動抽出で、得られた視野領域から光軸中心を求めることができる。

また、図2の(i)と(ii)はテストパターンを撮影した内視鏡画像に樽型の歪みが入っていることを示す。内視鏡画像を用いた胎盤マッピングのため、この樽型の歪みの補正を行う。



(i) テストパターン (ii) 内視鏡画像 (iii) 歪み補正した画像
図2 内視鏡画像の樽型歪みと歪み補正された画像

2) 画像の歪み補正のための輪郭抽出

内視鏡画像の画像領域の変動で歪み補正の自動化は困難であったが、能動輪郭抽出手法を用いて画像領域を取得し、画像の歪み補正を自動化したソフトウェアを開発する(図3)。



図3 画像の歪み自動補正用のソフトウェア

視野領域の自動抽出に、能動輪郭抽出手法を使用する。能動輪郭とは動的に進化する曲線のことであ

り、下記のように定義したエネルギーを持つ。

$$E_{contour} = \int_0^1 (E_{internal} v(s) + E_{image} v(s)) ds$$

ここで、 $E_{internal}$ は曲線の伸縮・屈曲による、 E_{image} は画像の微分によるエネルギーである。曲線は $E_{contour}$ を最小化することにより、画像内のあるオブジェクトの輪郭に引かれていく。

この手法は画像内の雑音に影響されやすいので、最適な結果を得るために、雑音を低減する。そこで、高速フーリエ変換 (FFT) のハイパスフィルタで画像の大まかな部分、すなわち雑音の部分低減し、更にガウシアンフィルタで画像をぼやけさせ、雑音をより認識しにくくする。

また、円形の視野領域が抽出できるために、まず能動輪郭の初期設定を円形にし、その屈曲エネルギーを基準屈曲エネルギーとする。更に、エネルギー測定の繰り返しが行われるたびに、出てきた制御点から重心を求め、2点間距離の和を 2π で割り半径を計算し、能動輪郭の円形の再設定を行う。

3) 対象物体の表面へのマッピング

本研究で行うシステムでは、胎盤モデルの形状を取得するために、超音波装置の代わりに MRI 装置が利用される。撮影された形状から 3D-Slicer ソフトウェアを用い、胎盤表面のモデルを作成する。ただし、ここで作成された vtk ファイル形式は複雑な構造となっているので、このファイルの中から三角形のデータのみ取り出し、胎盤表面を三角形パッチの構造にして、stl 形式ファイルを作成する。

また、マッピング位置を求めるために、まず取得した位置・姿勢情報を処理する。位置計測の座標系を $\{O\}$ 、内視鏡を $\{A\}$ 、胎盤を $\{B\}$ としたら、内視鏡の光点と画像上のピクセル座標は下記となる。

$${}^B C = {}^B R^T \times P_A - {}^B R^T \times P_B$$

$${}^B \tilde{m} = {}^B T \times {}^A \tilde{m} = \begin{bmatrix} {}^B R^T \times P_A - {}^B R^T \times P_B & {}^B R^T \times P_A - {}^B R^T \times P_B \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} {}^A m \\ 1 \end{bmatrix}$$

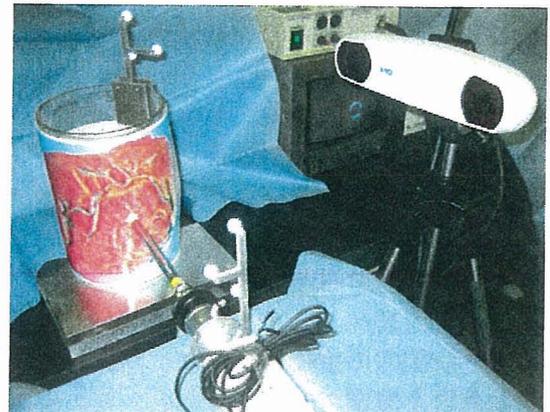


図4 対象物体マッピングの実験風景

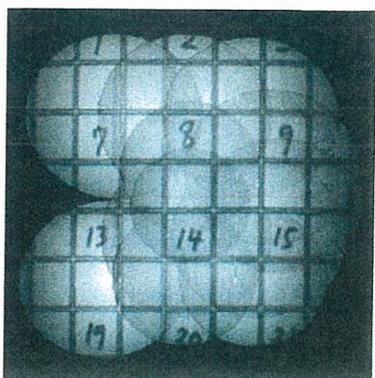


図5 テストパターンを用いた対象物体へのマッピング

光学式 3次元位置計測装置を用いて内視鏡及び3次元対象物体の位置・姿勢を自動的に取得できるようにする(図4)。また、対象物体に貼ってあるテストパターンを撮影し、取得した位置・姿勢情報を用いて、歪み補正した画像を物体の表面にマッピングを行う(図5)。

4) 三次元モデルの再現

マッピングした画像に立体感を持たせるために、対象物体の3次元モデルを作成し、歪み補正した画像をこの3次元モデルにマッピングすることで、対象物体の再現が3次元的に表示できた。また、対象物体と内視鏡との位置・姿勢関係から画面では内視鏡が観察する場所を表示する。

C. 研究結果

1) 内視鏡のキャリブレーション

テストパターンを撮影し、歪み補正を行った結果は図6となる。画像上の1と2で記された点はマーカーであり、この2点間の(u,v)座標の距離を測定した。結果は焦点距離 434.02 [pixel]、レンズから光点までの距離は 7.73 [mm]となった。ここで、焦点距離をある長さ単位で設定すれば、その pixel 単位との比率は解像度となる。ここで、焦点距離を 12.5 [mm]と設定し、解像度は 34.72 [pixel/mm]となった。

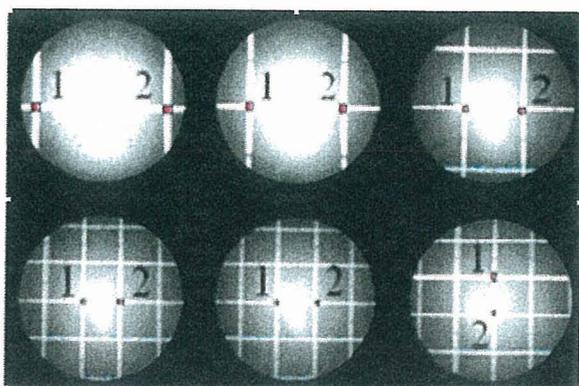


図6 歪みの補正

2) 光軸中心・視野領域の自動抽出

図7により、能動輪郭抽出手法は視野領域の抽出に有効であることを示す。ここでは、雑音が多く入った画像でも視野領域が抽出できた。

また、抽出した結果を用い、視野中心と光軸中心との比較に、視野座標(u,v)に対して光軸座標は(u-4,v-2)となる結果が得られた。

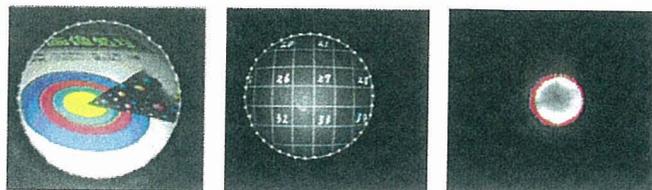


図7 視野領域の抽出

3) テクスチャーマッピング

マッピング方法の有用性の評価は決まった形の対象物体を用いて行われた。ここで、直径 160 [mm]・高さ 200 [mm]のサイズを持つ円柱に貼ってあるテストパターンを対象物体として使用した。対象物体の12枚撮影画像をマッピングした結果は図8に示される。ここで、撮影した対象物体をある程度再現できることが確認できた。しかし、まだ鮮明な画像が得られていないことは見られている。

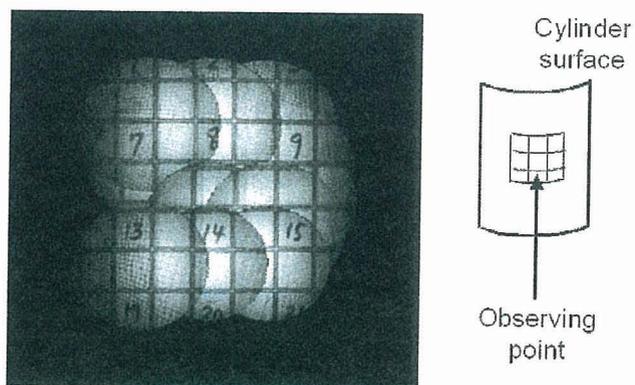


図8 テクスチャーマッピング

テクスチャーマッピングの実験では胎盤モデルを使用した。また、撮影した画像の例とマッピング結果は図9と図10に示す。マッピングの結果では、画像が良く胎盤表面のモデルにマッピングされたことが確認できた。マッピング時間は撮影した28枚の画像に対して約452.3[s]である。しかし、マッピングは各ピクセルに対して行われるので、記録されるデータ量が大きく、画像の表示に数十ミリ秒かかることがあり、少し途切れている感覚がある。



図 9 撮影した内視鏡画像群

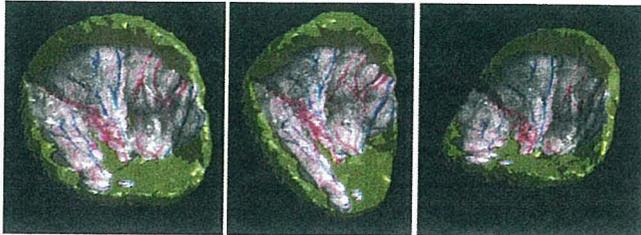


図 10 胎盤モデルへのテクスチャマッピング

4) ユーザーインターフェース

開発する胎盤表面のマッピングシステムが容易に操作できるように、簡単な操作ができるユーザーインターフェースを開発する。このインターフェースでは、まず内視鏡から撮った映像が表示される。撮影したい部位があれば、1つのボタンを押すことで内視鏡画像を取得する。また、光学式3次元位置計測装置の操作で、画像の撮影を行うとともに、内視鏡と超音波プローブの位置・姿勢情報が取得できる。ここで、胎盤の姿勢を超音波プローブの姿勢とすれば、胎盤の重心座標を行うことにより、胎盤の位置・姿勢情報を取得できるようになる。

作成したユーザーインターフェースは図 11 に示される。処理した画像の結果は表示されるので、画像の確認はすぐにできることにした。

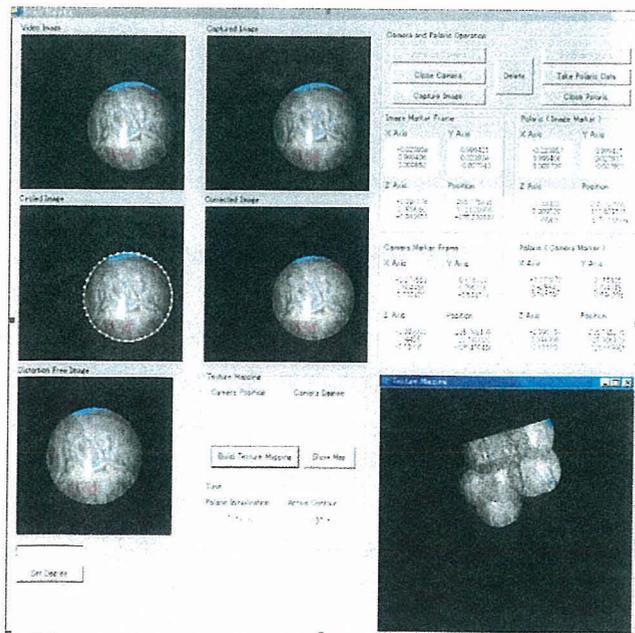


図 11 ユーザーインターフェース

D. 考察と結論

画像のマッピングには、良い結果を確認できたが、画像が重なった部分に、まだ鮮明な画像を得られていない。更なる発展として、色の混合処理が求められる。また、インターフェースを用い、システムを容易に操作できるが、今後は画像を表示だけでなく、医師を吻合血管の位置に誘導させるナビゲーションの機能を付ける必要がある。

胎盤表面をマッピングするためのシステムを開発した。具体的には、内視鏡キャリブレーションを行い、視野領域・光軸中心の自動取得を可能とした。また、位置・姿勢情報を用い、3次元胎盤マッピングを行い、全ての機能を1つのインターフェースにまとめることができた。

E. 研究発表

1. 李昇竣, 廖洪恩, 小林英津子, 原田香奈子, 千葉敏雄, 佐久間一郎: TTTS 手術支援システムにおける光を用いた吻合血管血流情報取得に関する研究, 第 45 回日本 ME 学会大会, 仙台, 2007.
2. Tua Namora Nainggolan, Hongen Liao, Etsuko Kobayashi, Toshio Chiba, Ichiro Sakuma: Development of Placenta Mapping System for Treatment of Twin-to-Twin Transfusion Syndrome (TTTS), In Proc. of the 21th International Congress and Exhibition, Computer Assisted Radiology and Surgery, Berlin, Germany, June 2007.
3. Tua Namora Nainggolan, 廖 洪恩, 佐久間一郎, 千葉敏雄: 双胎間輸血症候群の治療における胎盤表面のマッピング・システムの開発—能動輪郭抽出手法による内視鏡画像領域の自動取得—, 第 15 回日本コンピュータ外科学会大会, pp.165-166, 2006.
4. ナインゴラン トウア ナモラ, 貞島亮介, 廖 洪恩, 小林英津子, 神保泰彦, 佐久間一郎, 千葉敏雄: 双胎間輸血症候群治療におけるナビゲーション・システムの開発 胎盤血管の 2 次元マッピングに使用するシステムの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演概要集, pp.80, 2006.

(倫理面への配慮)

特に必要なし