

700500753A

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17年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 千葉 敏雄

平成18(2006)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 ----- 7
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 --- 12
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に関する
研究 ----- 15
佐久間 一郎
6. 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 ----- 18
伊関 洋
5. 胎児外科手術用ロボティックデバイスとその制御手法の研究 ----- 21
藤江 正克
6. 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 ----- 24
望月 剛
7. 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 ----- 29
日高 恒夫
8. 複合型光ファイバによるレーザー治療デバイスの開発 ----- 36
岡 潔

- III. 研究成果の刊行に関する一覧表 ----- 44

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、患児長期 QOL の大幅な改善や医療費の低減を目的とするものである。そこで我々は、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、レーザー治療デバイス、ナノ技術センサーデバイス、マイクロ手術ロボット、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、子宮内手術支援システムを提案し、その各要素技術の研究を行った。今後は、要素技術の更なる小型化・高機能化・高精度化・リアルタイム性の向上に重点的に取り組み、それらの統合システムを構築した後、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/助教授
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子宮内異常が診断された場合、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、胎児外科領域は比較的新しい分野であり、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・機器はほとんど存在しない。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ことを目的として、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している。具体的には、双胎間輸血症候群(TTTS)のレーザ

ー治療、胎児脊髄髄膜瘤(MMC)修復術の内視鏡下低侵襲手術手技を対象として、研究を進める。

B. 研究方法

B-1. レーザー治療デバイス

TTTS のレーザー治療では、子宮内に留置した内視鏡のチャンネルからレーザーファイバーを挿入し、胎盤吻合血管にレーザーを照射する。このとき、内視鏡による観察中心と治療用レーザー中心が一致しないため、正確に目標位置にレーザーを照射しにくいという問題があった。そこで、治療用レーザー光と内視鏡画像を1本の光ファイバーで伝送可能な複合型光ファイバー(既開発：径3mm)を胎児治療用デバイスとして改良する。子宮内手術に適用可能とするため、径約2mmに細径化し、可撓性及び操作性を高める。

B-2. ナノ技術センサーデバイス

術中および術後の胎児モニタリングを行うため、体内型生理データ計測デバイスを開発する。まず、子宮内胎児の体内から無線で信号を外部に転送する方式を検討するため、FM アナログ伝送方式と、Bluetooth デジタル伝送方式のデータ伝送実験を行った。また、生理データとして血中酸素飽和度を計測するため、反射型パルスオキシメータの計測範囲拡大の研究を行った。

B-3. マイクロ手術ロボット

子宮内手術では、胎盤付着位置により術具のアプローチ方向が制限される。従来の硬性の術具では、例えば腹側付着胎盤や羊水中に浮遊する胎児の患部に対し、最適な方向からアプローチすることはしばしば困難である。そこで、術具先端に多自由度を有する細径手術ロボット(径約3mm)を開発する。TTTS のレーザー治療や、MMC 修復術におけるコラーゲンゲルパッチ貼付術を対象として、レーザーファイバーを子宮内で屈曲させるロボットと、子宮内

でカラーゲルパッチを展開・保持し、標的組織に押し当てるためのスタビライザーを開発する。

B-4. 術中画像誘導支援

B-4-1. 三次元斜視内視鏡

外径 5.4mm で直視の三次元硬性内視鏡は既に開発したが、内視鏡下手術で使用頻度の高い斜視鏡は現在外径 11mm と太く、胎児治療へは適用できない。そこで、細径の三次元斜視内視鏡を開発する。細径化と併せて、レーザーファイバーなどの処置具挿入用チャンネルを設ける。

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が、このコイルは将来の MRI 下手術を想定した場合には作業の妨げとなる。そこで、内視鏡先端に信号受信コイルを搭載することで、限られた範囲ではあるが、高分解能の内視鏡観察部深部の MRI 画像を高速に取得することを検討する。

B-4-3. 画像誘導ナビゲーション

術中画像である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技術を開発する。まず、狭内視鏡視野を補い、術野である胎盤全体の血管走行を把握することを目的として、内視鏡画像合成技術を開発する。また、術具が胎盤および胎児に偶発的に接触することを避けるため、術具と患部の接近状態をリアルタイムに把握し警告するシステムを開発する。これらの技術には、胎盤や胎児の三次元位置・形状データ取得が不可欠である。そこで、超音波装置から 3 次元超音波データをリアルタイムに外部に転送する技術を開発する。

(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無い。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. レーザー治療デバイス

複合型光ファイバーの細径化(径約 2mm)とともに、その基本性能試験を行った。その結果、レーザー出力の変動によらず、焼灼痕の大きさと深さが常に一定の、安定した焼灼が可能であることが示された。並行して、狭い内視鏡視野を補うための擬似的画像広角化技術を開発し、その有用性を確認した。

C-2. ナノ技術センサーデバイス

無線データ伝送実験を行い、5-10cm の距離までワイヤレスデータ伝送ができることを確認した。反射型パルスオキシメーターの研究では、光源と光検出部の間隔を可変とすることで、皮膚からの深さが異なる動脈の血中酸素飽和度も検出可能となる見通

しを得た。

B-3. マイクロ手術ロボット

レーザーファイバーを搭載し、手元スイッチで先端が屈曲可能な細径手術ロボットを開発した。スライダリンク式(径 3.5mm)、ワイヤ式(径 2.4mm)を開発し、in vitro にてその基本性能を確認した。また、径 3mm のスタビライザーを開発し、水中でのカラーゲルパッチを展開・保持できることを確認した。

C-4. 術中画像誘導支援

C-4-1. 三次元斜視内視鏡

内径 1.2mm の鉗子口を有し、観察方向が 30 度(斜視)、外径 5.9mm の三次元斜視内視鏡を設計した。対物レンズ先端部にプリズムを配置し、対物レンズと CCD を外筒管に平行に配置する方式を採用し、コンパクトな配置のレンズ群と対物レンズ枠を製作した。

C-4-2. マイクロ MRI 搭載型内視鏡

MRI 画像取得のための MEMS コイルによる NMR 信号受信デバイス、フレキシブルな MRI 受信デバイス、および平面型コイルを用いた MR カテーテルの基礎的な研究を行い、その特性を計測しえた。

C-4-3. 画像誘導ナビゲーション

内視鏡の光学系歪み、内視鏡光軸と物体表面の傾き、距離に依存する画像の変形を補正し、内視鏡画像を合成するソフトウェアを開発した。テストパターンにて評価した結果、局所的な内視鏡画像から、広域的な画像を再構築できることを確認した。また、術具先端と対象臓器との距離をリアルタイムに提示する近接覚ナビゲーションを開発したが、ここでは直感的な提示方法として、距離に応じて色や音を変化させる手法を採用した。さらに、三次元超音波診断装置を改良し、リアルタイムに外部 PC へデータ転送を行う機能を搭載した。転送速度は 10vol/sec であり、今後はこのデータを上記ナビゲーションに読み込むことを検討する。

D. 考察

本年度は提案された各種デバイス、ソフトウェアの基礎的研究に集中し、その要素技術の開発を行った。これらの研究の結果、目標とする仕様の実現可能性を評価し、サイズや精度、安全性などの課題を明らかにすることができた。今後は、デバイス単体の機能向上のみならず、システム統合を視野にいれた研究が必要となる。

E. 結論

本年度は、子宮内手術支援システムを提案し、レーザー治療デバイス、ナノ技術センサーデバイス、マイクロ手術ロボット、術中画像誘導支援システムの研究を行い、各要素技術を開発した。今後は、要

素技術の更なる小型化・高機能化・高精度化・リアルタイム性の向上に重点的に取り組む。さらに、デバイスやソフトウェアを統合した包括的手術支援システムの構築を目指す。最終年度には、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)SatoshiHayashi,HaruhikoSago,ReikoHayashi,SatoshiNakagawa,MichihikoKitagawa,KatsuyukiMiyasaka,ToshioChiba,MichiyaNatori:

Manifestation of irror Syndrome after Fetoscopic Laser Photocoagulation in Severe Twin-Twin Transfusion Syndrome.

Fetal Diagn Ther 21:51-54 2006.

2)Kota Tsubouchi, Shin Enosawa, Kanako Harada, Jun Okamoto, Masakatsu G Fujie, Toshio Chiba.

Evaluation of relationship between viscoelastic stress and strain of fetal rat skin as a guide for designing structure and dynamic performance of manipulator for fetal surgery.

Surgery Today in press

その他は分担研究報告書に記載

2.学会発表

1)Chiba T, Yamashita H, Dohi T :

Newly developed endoscopic forceps manipulator for intrauterine surgery,

IFMSS 2005 24th annual meeting, Denmark,May 2005

2)千葉 敏雄：胎児に対するコンピュータ支援手術/治療の可能性,第14回日本コンピュータ外科学会大会・第15回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集,pp.31-32,千葉,Nov.2005

その他は分担研究報告書に記載

H.知的財産権の出願・登録状況

分担研究報告書に記載

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 <テーマ>胎児外科手術, 特に双胎間輸血症候群のレーザー治療支援のための細径多自由度ロボットデバイスの開発を行う. <背景>双胎間輸血症候群は一卵性一絨毛膜性双胎において両児の胎盤循環の血管吻合に起因して生じる症例であり, 内視鏡下に吻合血管を選択的にレーザー凝固する術式が効果的とされている. しかし胎盤への損傷を防ぎ, 母子共に安全に手技を行うためには従来の直線状の手術手技では不十分であるため, 子宮内で柔軟にアプローチ方向を変えられることができる細径多自由度屈曲マニピュレータの開発が求められている. <目的>本年度の分担研究の目的は主として, 双胎間輸血症候群のレーザー治療に特化させたφ3.5mmの2自由度屈曲マニピュレータの開発, および評価を行う.

A. 研究目的

本研究の目的は, 出生前の治療が患者の QOL の大幅な改善に有効であるとされる, 胎児外科手術に特化した低侵襲手術器の開発である. 初年度はまず双胎間輸血症候群のレーザー治療を目標に, 手術手技の改善のための多自由度細径マニピュレータの開発を行なう. 双胎間輸血症候群は一卵性一絨毛膜性双胎において両児の胎盤循環の血管吻合に起因して生じる症例であるが, 内視鏡下に胎盤上の吻合血管を選択的にレーザー凝固するという術式が効果的とされている (Fig. 1), しかし内視鏡的な胎盤表面へのアプローチは胎盤や吻合血管の位置によっては適応が難しく, 胎盤損傷を避け安全に治療を行うための多自由度を有する手術器具の開発が求められている.

本分担研究者らはこれまでに腹腔鏡下外科手術用のφ10mm 多自由度屈曲鉗子マニピュレータを開発しており, 本研究では胎児手術に特化させるため, このマニピュレータの大幅な細径化, 並びにレーザー治療用ファイバを搭載可能なセンタチャンネルの確保を第一の目的とする. また, 試作機の性能, 特に屈曲角度や屈曲力については胎盤環境を模したファントム実験にて妥当性を評価したので報告を行う.

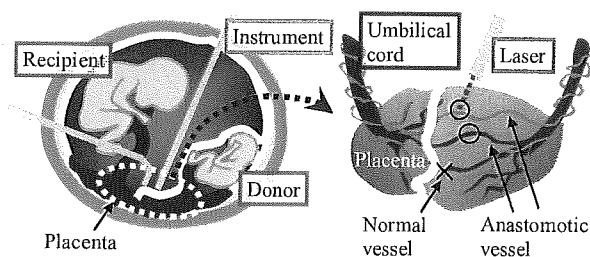


Fig. 1 双胎間輸血症候群のレーザー治療

B. 研究方法

B.1 1 自由度屈曲機構

従来の腹腔鏡下外科手術用マニピュレータに採用した多節スライダ・リンク機構を改善することにより, 少ない駆動要素で1自由度あたり±90°の駆動範囲を有する新たな屈曲機構を実現した (Fig. 2).

Frame1 と Frame3 は互いに向き合う円弧 Arc1, 円弧 Arc2 が接するように Frame2 を介して連結される. Frame2 は Link1, Link2 のスライド運動によりモーメントを与えられると Frame3 周りに回転し, 同時に Frame1 上の Arc1 が Frame3 上の Arc2 の周りを外サイクロイドの軌道を描きながら転がり運動をする. Arc1 と Arc2 の半径が一致する場合, リンクのスライド運動により Frame2 が Frame3 に対して θ だけ回転すると Frame1 も Frame2 の周りに θ だけ回転し, 合計 2θ の回転角度を得ることができる (Fig. 3).

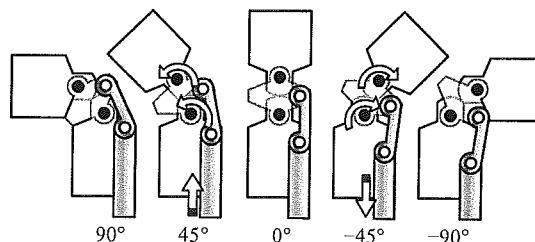


Fig. 2 1自由度屈曲機構の屈曲駆動

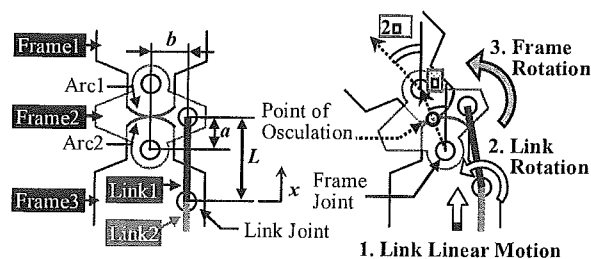


Fig. 3 1自由度屈曲機構の基本原理解説図

ここで Link1 と Link2 を連結する Link Joint のスライド変位量 x と Frame2 の回転角度 θ の関係は, Fig. 3 で示した各要素の寸法を用いて式(1)で表せる.

$$x = L + a(\cos \theta - 1) + b \sin \theta - \sqrt{L^2 - 2(a^2 + b^2)(1 - \cos \theta) + \{a(\cos \theta - 1) + b \sin \theta\}^2} \quad (1)$$

$$= f(a, b, L, \theta)$$

また, Arc1 と Arc2 は互いに滑らない構造にする必要があるため, 2本1組のステンレスワイヤロープ

(朝日インテック, F-20) をガイドとして用いている (Fig. 4).

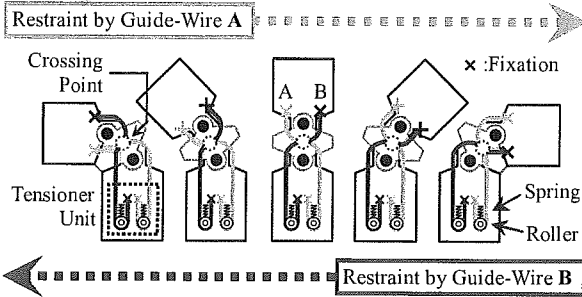


Fig. 4 ワイヤガイドによる屈曲制御機構

B.2.2 自由度屈曲マニピュレータ

2 個の 1 自由度屈曲機構を直列に連結し, 上下左右に屈曲が可能な, 外径 $\phi 3.5\text{mm}$ の 2 自由度屈曲マニピュレータを製作した (Fig. 5). フレームの中心には $\phi 0.8\text{mm}$ のエンドエフェクタ用チャンネルを設け, 屈曲駆動には AC サーボリアモータ (千葉精密, MASC-D16H06) を用い, 実験用としてダイヤル式のインタフェースを取り付けている (Fig. 6).

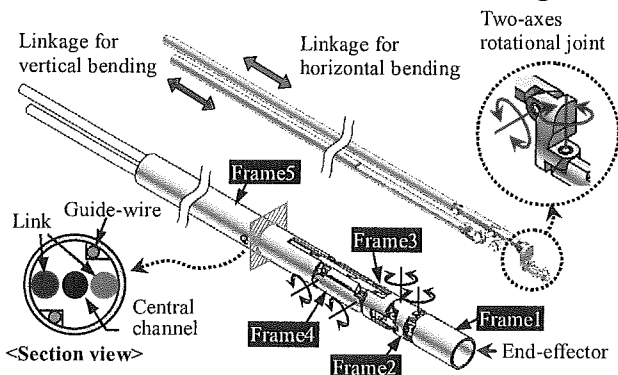


Fig. 5 2 自由度屈曲機構の構成要素

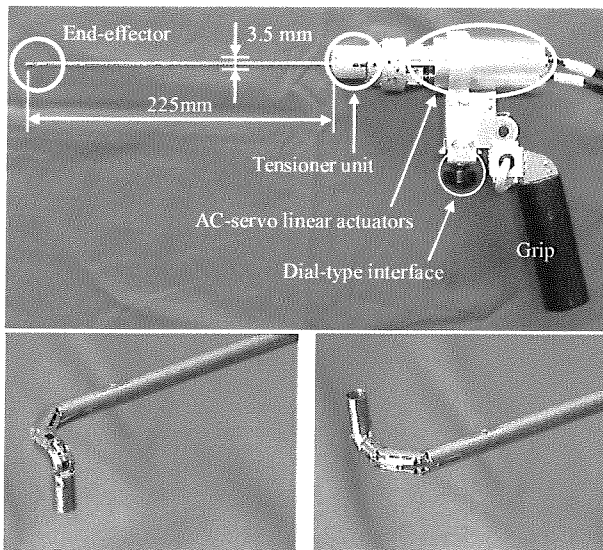


Fig. 6 2 自由度屈曲マニピュレータ

(倫理面への配慮) 本研究では現時点で動物実験等は行っておらず, 特に配慮はしていない.

C. 研究結果

エンドエフェクタにはコア径 $\phi 0.4\text{mm}$, 外径 $\phi 0.7\text{mm}$ のレーザファイバ (E-6100-B, Dornier Med-Tech) を搭載し, 鶏肉片を胎盤ファントムして凝固実験を行なった. Nd:YAG レーザを用い, 臨床での使用に合わせて 50W , 1 秒間照射に設定した. マニピュレータを限界まで屈曲させながら水中のファントム表面上の数箇所レーザを照射した. ファントム組織を十分凝固したことを目視で確認した (Fig. 7). 屈曲トルクは最大 27.9mNm であり, ファイバを搭載した状態で最大 66° の屈曲が可能であった.

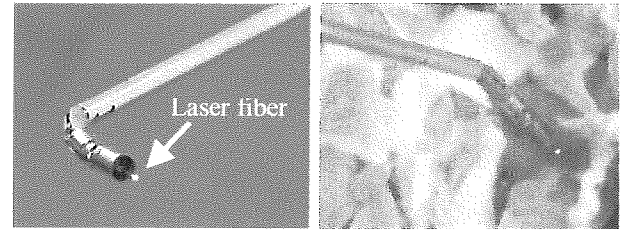


Fig. 7 レーザ凝固実験

D. 考察

小さな曲率半径で最大 66° まで屈曲させた状態であってもレーザ凝固には影響はなかった. 先端部では約 200gf に相当する発生力を有し, 実用化に耐えうる屈曲性能を確認した. 屈曲角度が 90° に達しないのはファイバの剛性が主な原因だが, マニピュレータの曲率半径と発生力を調整することで, 凝固能力を落とさずにより大きな屈曲角度の実現が可能と考えられる. 今後, 鉗子剛性の向上を図り, 羊水中でのレーザ照射を模した環境下での実験により臨床使用に向けた問題点の洗い出しを行う.

E. 結論

本研究では双胎間輸血症候群のレーザ治療に有効な外径 $\phi 3.5\text{mm}$ の多自由度屈曲マニピュレータを開発した. Nd:YAG レーザファイバを搭載した状態で, 最大 66° まで大きく屈曲させながら確実に生体組織を凝固できることを確認した.

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

該当なし

G.2 学会発表

1) Chiba T, Yamashita H, Dohi T: Newly developed endoscopic forceps manipulator for intrauterine surgery, IFMSS 2005 24th annual meeting, Helsingor, Denmark, May 2005

2) 山下 紘正, 松宮 潔, 正宗 賢, 廖 洪恩, 千葉 敏雄, 土肥 健純: 胎児外科手術用多自由度屈曲マニピュレータの開発, 第14 回日本コンピュータ外科学会

大会・第15 回コンピュータ支援画像診断学会大会合
同論文集, pp. 239-240, 千葉, Nov. 2005

H. 知的財産権の出願・登録状況
該当なし

研究要旨

平成 17 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①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、および、②反射型吸光度計測によるカプセル型酸素飽和度計の研究を進めた。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。また、反射型吸光度計測によるカプセル型酸素飽和度計では、カプセル型デバイスからの生理データ伝送の基礎実験と反射型酸素飽和度計測の研究を行った。反射型パルスオキシメータの研究では、皮膚からの深さが異なる動脈に対して、光源と光検出部の間隔を可変とすることによって、幅広い深さの動脈における酸素飽和度が検出可能となることを示した。

①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

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。

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 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 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。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。

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 \times 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、その酸素飽和度によって透過・吸収する光の波長が異なるので、その違いを画像で観察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は 80 $\mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ 、ミラー部を支持する 4 本の

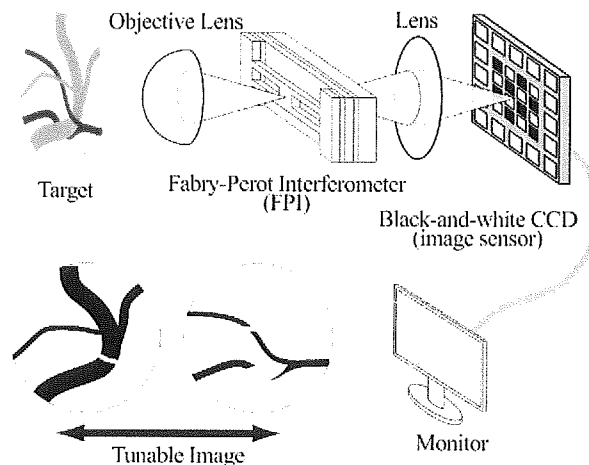


Figure 1 分光カメラの概略図

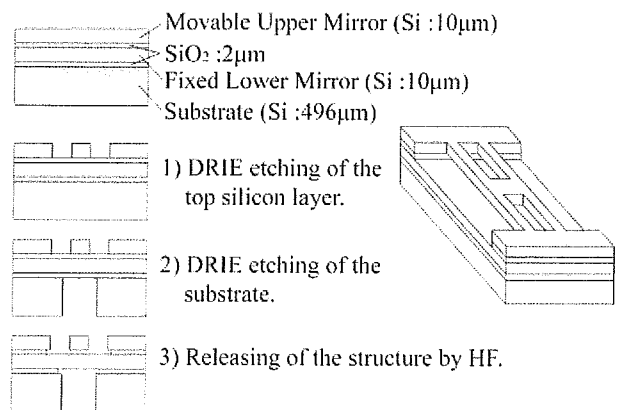


Figure 2 DSOI を利用した FPI の試作プロセス

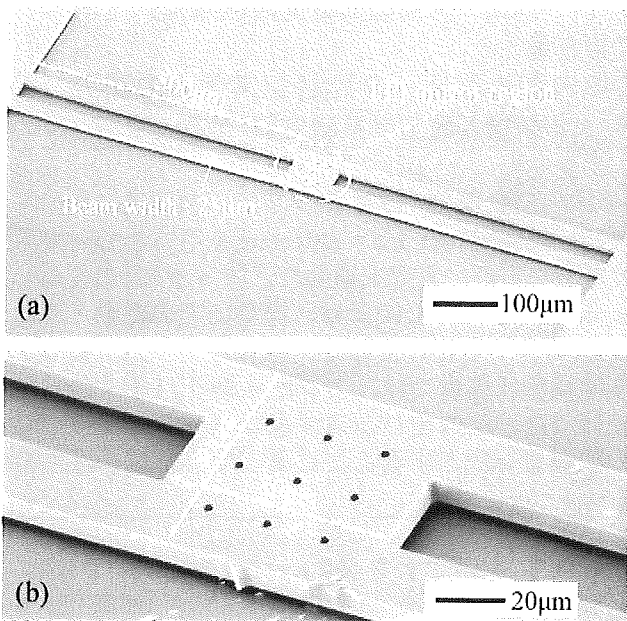


Figure 3 試作した FPI の電子顕微鏡写真

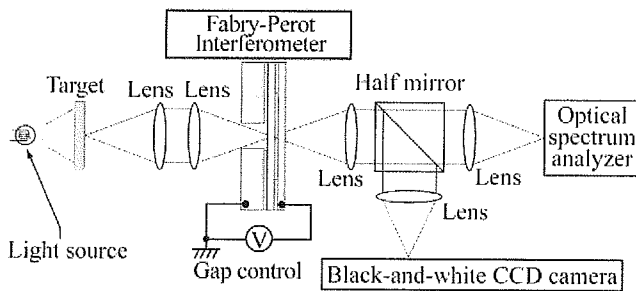


Figure 4 特性計測実験セットアップ概略

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て、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よ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出てしまい、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出てしまったためだと考えられる。

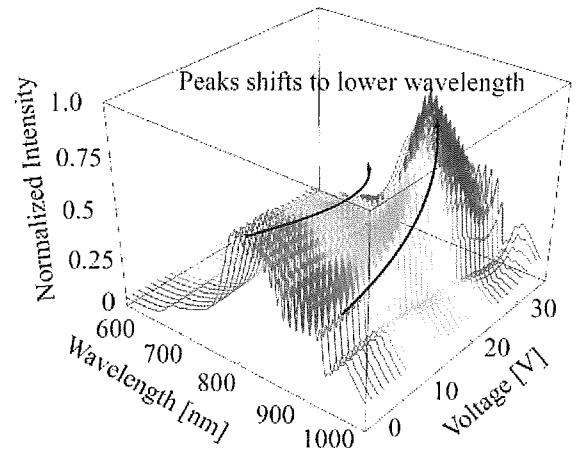


Figure 5 印加電圧と透過光スペクトル変化

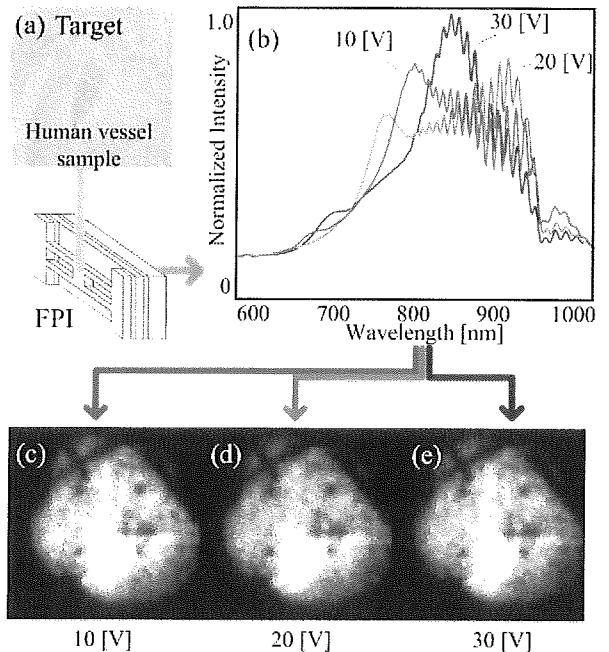


Figure 6 FPI の分光特性と取得画像

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、光学特性の向上を行う。

また、Fig. 6 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。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：特になし
2. 学会発表：特になし

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反射型吸光度計測によるカプセル型酸素飽和度計の研究

A. 研究目的

体内型生理データ計測デバイスとして、本年度は反射型吸光度計測によるカプセル型酸素飽和度計測の研究を行った。本項目での実現を目指すデバイスの概略図をFig. 7に示す。このデバイスは、データ伝送部と信号処理部、及び、生理データ計測のためのセンサ部からなる。本研究では、血液の酸素飽和度を体内で計測することを目標とするため、発光素子と受光素子を持つ反射型吸光度計測ができるデバイスの実現を目的とする。本年度はこのデバイスの基礎的な研究として、カプセル型デバイスからのデータ伝送の検討と、反射型酸素飽和度計測の研究を行った。反射型酸素飽和度計測の研究では、深い動脈からも酸素飽和度を計測できる、適応範囲の広い反射型パルスオキシメータの実現を目指す。そのため、様々な深さに存在する動脈から酸素飽和度の算出に十分な反射光を得ることを目的とした。

B. 研究方法

まず始めに、カプセル型デバイスの生理データ伝送の手法として、FMアナログ伝送と、Bluetoothによるデジタル伝送の検討を行った。FMアナログ伝送デバイスおよび、Bluetoothデジタル伝送デバイスを水中に配置し、それぞれの手法でデータ伝送の実験を行った。Fig. 8は試作したカプセル型FMアナログ伝送デバイスの写真である。それぞれの手法で5~10 cm程度の距離までデータ伝送ができることを確認した。ただし、体内型デバイスとして利用した際には、生体内を通過することによりノイズが増加し、S/N比が低下することが考えられたため、デジタル通信を利用した手法の方が適しているという結論に達した。そこで、本年度はBluetoothによるデジタル伝送を採用し、次年度以降にデジタル通信に利用する周波数を変更することで、体内からの確実なデータ伝送を実現することとした。

次に、反射型酸素飽和度計測の研究として、反射型パルスオキシメータの計測範囲拡大を行った。パルスオキシメータにはLED (Light Emitting Diode) とPD (Photo Diode) を向かい合わせに配置する透過型と同一面内に配置した反射型がある (Fig. 9)。

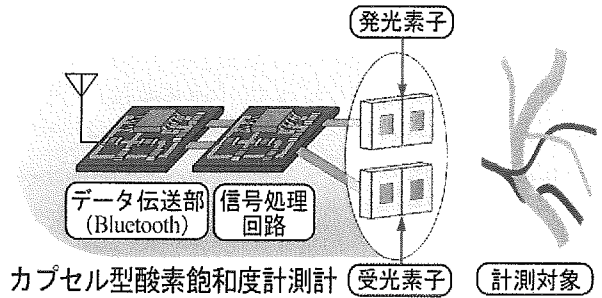


Figure 7 体内型生理データ計測デバイスの概略

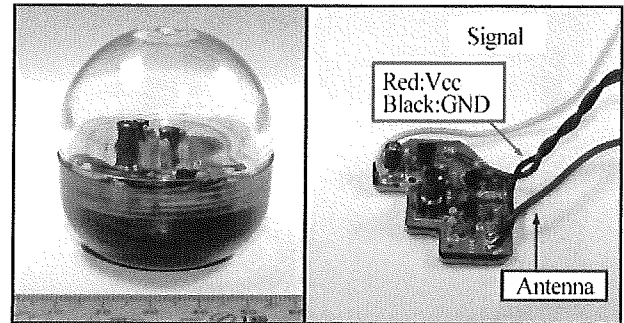


Figure 8 カプセル型FMアナログ伝送デバイス

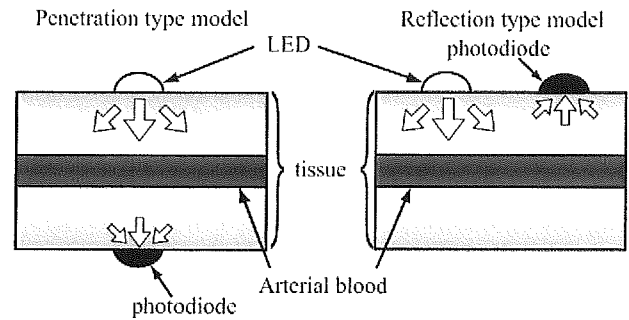


Figure 9 透過型及び反射型パルスオキシメータ

パルスオキシメータは、拍動に伴う動脈血の流量変化を吸光度の変化として計測し、吸光度変化から酸素飽和度の算出を行う。そのため、高い精度で酸素飽和度を計測するために、動脈からの光を十分に得る必要がある。透過型は、体組織が厚い部位では十分な透過光の光量を確保することが困難であるため、より自由な測定部位を持つ反射型が注目されている。しかし、従来の反射型では、前額部など動脈が表皮から近い位置にあり、十分な反射光が得られる部位でしか計測できない問題があった。

これに対し、ランダムウォークモデルを用いることによって、PDで検出される光が通る確率の高い経路 (mean path) はFig. 10に示すバナナ状の形をしており、LED-PD間距離 r を大きくするほど光の平均浸透深さが深くなることが報告されている。これより、動脈の存在する深さ z に応じて反射光を得るのに最適なLED-PD間距離 r が存在すると考えられる。そこで、本研究ではLED-PD間距離 r を可変とすることによって、様々な深さに存在する動脈から酸素飽和度の計測を行う。

(倫理面への配慮) 関連する研究項目はない。

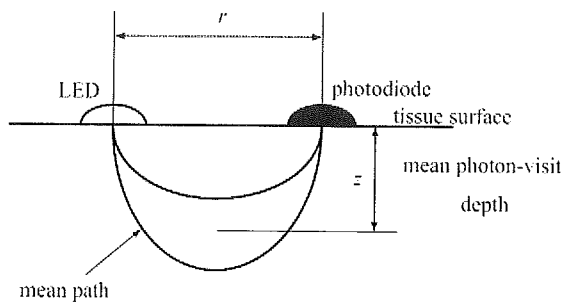


Figure 10 ランダムウォークモデル

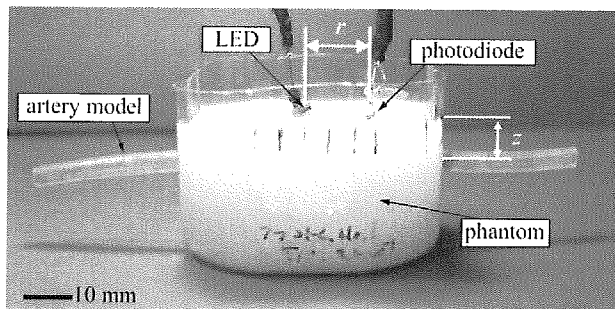


Figure 11 血液ファントムによる計測実験概略

C. 研究結果

・光学的ファントムを用いた反射光強度計測実験

人体は外部から動脈の深さ z を正確に知ることは困難であるため、内部に動脈モデルを埋設したファントム(模型)を試作した。人体組織のモデルとして用いるため、人体組織と同等の、弱吸収媒質に強散乱の光学特性を持たせる必要がある。本研究では弱吸収媒質としてPDMS (polydimethyl-siloxane)を、強散乱粉末としてルチル型酸化チタン粉末を利用してファントムを試作し、内部に動脈モデルとしてシリコンチューブを利用した。チューブを埋設する深さ $z = 5, 10$ [mm]の2種類のファントムを試作した。また、擬似的な血流を実現するために、希釈した墨汁をペリスタポンプによって断続的に送り込む方法を利用した。

このファントムを用いてLED-PD間距離 r と反射光強度の関係を実験的に計測した。ファントム表面にLEDとPDをFig. 11に示すように配置し、LEDにより中心波長 880 nmの近赤外光を照射し、PDで反射光強度を計測した。チューブ内に疑似血液が流れている場合には、LEDの光は疑似血液に吸収される。これより、PDの出力はチューブ内の疑似血液の有無によりFig. 12に示す変動成分 ΔA を持つ。この変動成分から酸素飽和度を算出するため、 ΔA が大きいほど精度良く血液の酸素飽和度を計測できる。そこで、LED-PD間距離を1~15 mmの範囲で変化させ、反射光強度の変化 ΔA をPDで計測した(Fig. 13)。この測定範囲において、ファントム表面から動脈モデルまでの距離 $z = 5$ [mm]の場合には、 $r = 1$ [mm]で、 $z = 10$ [mm]の場合には、 $r = 4\sim 7$ [mm]で最大の反射光強度を得た。これより、動脈の深さ z に応じて、最大の反射光強度を得るために適切なLED-PD間距離 r が存在することが確認された。

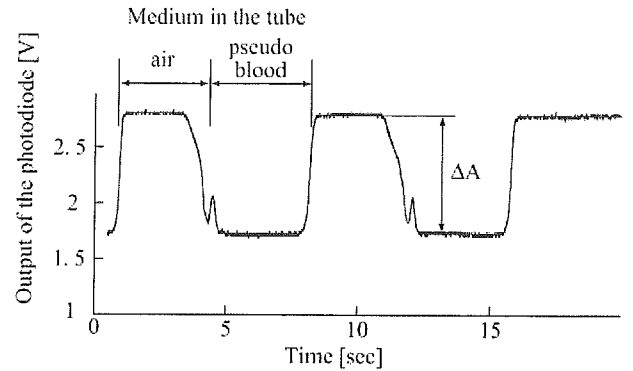


Figure 12 血流ファントムにおける計測結果

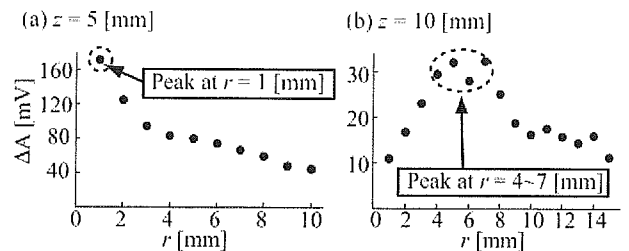


Figure 13 LED-PD 間隔によるPD 出力の変化

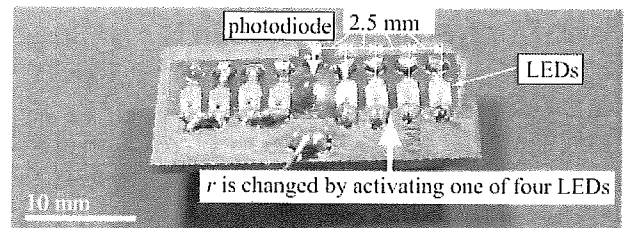


Figure 14 LED-PD 間距離可変プローブ

・人体を対象とした計測実験

次に人体を対象として脈波の確認実験を行った。Fig. 14に示すLED-PD間距離可変の計測プローブを試作し、計測対象は手首の動脈とした。指を用いて動脈の拍動を確認できるライン上にプローブを配置し、点灯させるLEDを変えることで $r = 2.5, 5.0, 7.5, 10.0$ [mm]と変化させ、それぞれの場合において脈波が観察されるかどうかを確認した。その結果、 $r = 2.5, 5.0$ [mm]の場合に脈波が確認できなかった部位において、 $r = 7.5, 10.0$ [mm]では脈波が確認できるようになった(Fig. 15)。

D. 考察

人体を対象とした計測実験において、LED-PD間距離を広くすることによって、脈波を計測できるようになった。これは、LED-PD間距離を広くすることで、光の平均浸透深さと動脈が重なったためだと考えられる。また、 $r = 7.5$ [mm]のときに最も脈波の振幅を大きく計測でき、人体においても最大の反射光強度を得るために最適なLED-PD間距離 r が存在することが示された。人体では外部から正確な動脈の深さ z を知ることは困難であるため、LED-PD間距離を変化させることのできるプローブで計測することで、体表から様々な深さに存在する動脈から脈波の振幅を計測できるようになり、酸素飽和度の計測が可能になると考えられる。

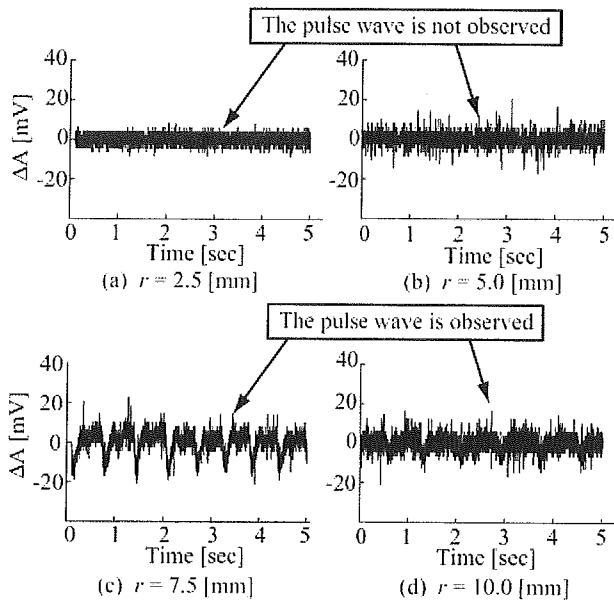


Figure 15 LED-PD 間距離可変プローブによる脈波観察実験

E. 結論

PDMSとルチル型酸化チタン粉末を用いて、人体と同様の光学特性を持つファントムを実現した。このファントムを用いて、LED-PD間距離と動脈モデルからの反射光強度の関係を実験的に計測した。動脈モデルの深さが5 [mm]の場合には、LED-PD間距離が1 [mm]のときに最大の反射光を得た。一方、動脈モデルの深さが10 [mm]のとき、最大の反射光強度はLED-PD間距離が4~7 [mm]のときに得られた。これより、動脈の深さに応じて、反射光強度を最大にする最適なLED-PD間距離が存在することを実験的に確認した。

さらに、人体を対象として脈波を計測する実験を行った。同一部位における計測で、LED-PD間距離が2.5, 5.0 [mm]の場合には脈波が確認されず、LED-PD間距離を7.5, 10.0 [mm]に広げることで脈波が確認された。また、7.5 [mm]のときに最も脈波の振幅を大きく計測できた。脈波の振幅が大きく計測されれば精度よく酸素飽和度を算出できる。そのため、動脈の深さに応じてLED-PD間距離を変化させることで、反射型パルスオキシメータの計測可能部位が拡大できると考えられる。

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：特になし
2. 学会発表：特になし

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 17 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、フレキシブルなMRI (Magnetic Resonance Imaging) 信号受信デバイスの研究を進めた。フレキシブルなMRI信号受信デバイスでは、内視鏡先端部にMRI受信部を配置するための基礎的な研究として、直径 10 mmのフレキシブルな平面型コイルとコンデンサを試作し、直径 10 mmの円筒側面に配置できるMRI受信部を実現した。

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画像取得ができると考えた。

そこで、本研究では内視鏡先端部に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、内視鏡先端部にMRI信号受信デバイスを配置するための基礎技術として、MEMS技術を利用したフレキシブルかつ微小なコイルとコンデンサを持つ共振回路を試作し、カテーテルの側面に配置可能なMRI信号受信部の実現を目的とする。

B. 研究方法

カテーテルの側面に配置できるフレキシブルなデバイスを実現するために、本研究ではガラス基板上にMEMS技術を利用してコイルとコンデンサを試作し、さらに柔軟なシリコンポリマー (PDMS : polydimethylsiloxane)で保護した後に基板を除去する方法を利用する。さらに、試作したコイルとコンデンサをMRIの受信デバイスとして利用するためのアンテナ回路として組み合わせる。この際、MRI信号を効率良く受信できるようにコイルとコンデンサの設計を行い、さらにQ値が高い受信コイルの実現を行うことで高いS/N比でのMRI信号受信を目指す。

Fig. 1 は試作したフレキシブルなMRI信号受信デバイスの製作プロセスである。このデバイスは、まず始めにガラス基板上にCr/Cu/Tiの薄膜を蒸着装置により製膜し、その上に絶縁層としてポリイミドを製膜する。さらにコイルとなる部分、及びコンデンサの上部電極としてCr/Cuを蒸着する。ここで、蒸着装置で製膜できる金属の膜厚は非常に薄く、抵抗値が高いため、フォトレジストを側壁とした電気メッキを行うことで膜厚を増加させ、抵抗値の低下とQ値の上昇を行う。最後に、構造を保護するために柔軟なシリコンポリマーを製膜し、フッ酸によってガラス基板を除去する。Fig. 2はこのプロセスによって試作したマイクロコイルとマイクロコンデンサである。

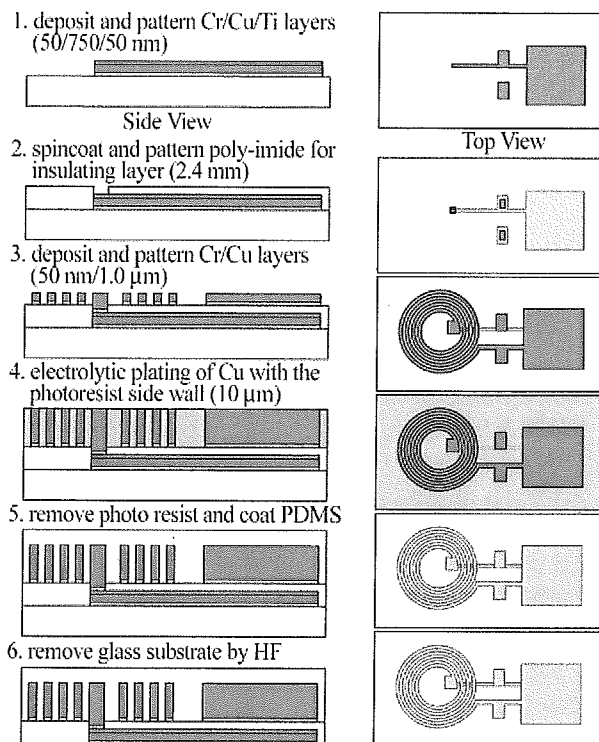


Figure 1 フレキシブルなMRI信号受信デバイスの製作プロセス

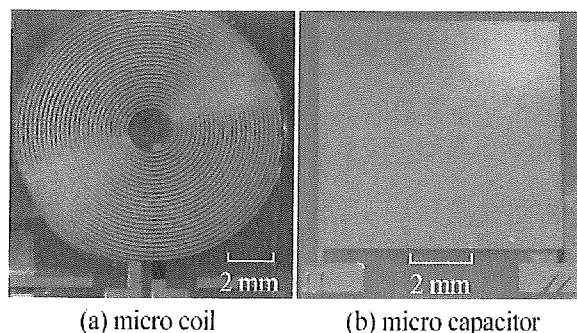


Figure 2 試作したフレキシブルなマイクロコイルとマイクロコンデンサ

(倫理面への配慮) 関連する研究項目はない。

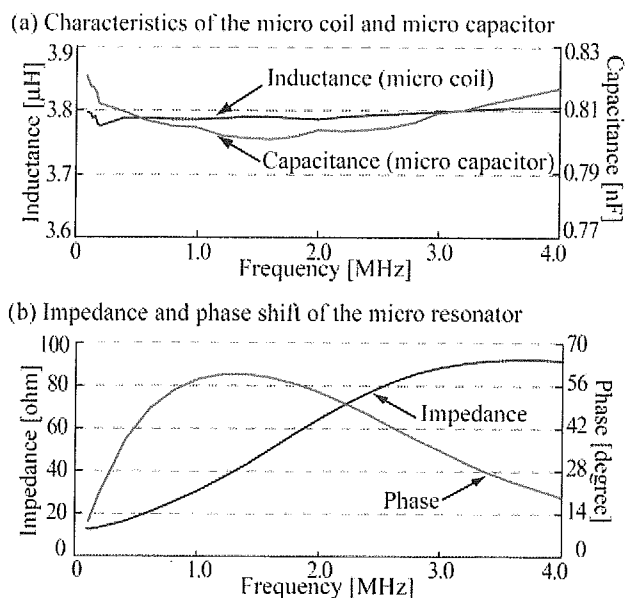


Figure 3 フレキシブルデバイスの回路特性

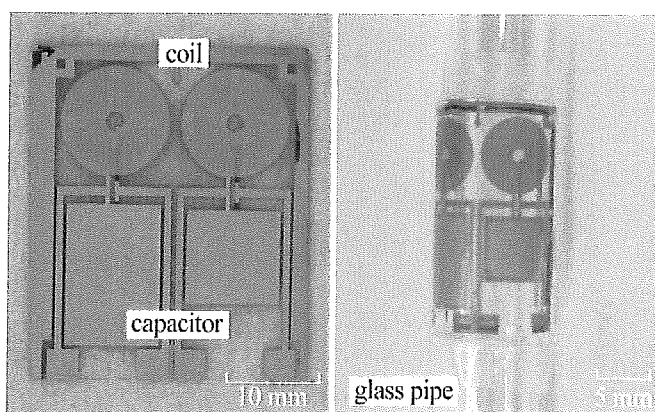


Figure 4 フレキシブルデバイスの曲面配置

C. 研究結果

MRI信号受信デバイスを評価するために、マイクロコイルとマイクロコンデンサを個別に試作し、その特性計測を行った。Fig. 3(a)は、試作したマイクロコイルのインダクタンスとマイクロコンデンサのキャパシタンスの周波数特性である。本実験では利用可能な磁場が 45 mTであり、この磁場におけるラーモア周波数は 1.9 MHzである。そこで、周波数 0~4.0 MHzの範囲で特性の計測を行った。Fig. 3(a)より、マイクロコイルのインダクタンスは 3.8 μ H、マイクロコンデンサのキャパシタンスは 0.81 nFであった。また、コイルのQ値は、2 MHzにおいて 4であった。

次に試作したコイルとコンデンサを並列に接続し、1.9 MHzでMRI信号を受信できるアンテナとした。アンテナ回路の特性をFig. 3(b)に示す。これより、1.9 MHzで 50 Ω にインピーダンスを調整することを実現した。最後にマイクロコイルとマイクロコンデンサを同時に作成し、フレキシブル化を行うことで円筒形の曲面へ配置可能なデバイスを試作した。Fig. 4は、試作したフレキシブルなMRI信号受信デバイスの写真である。

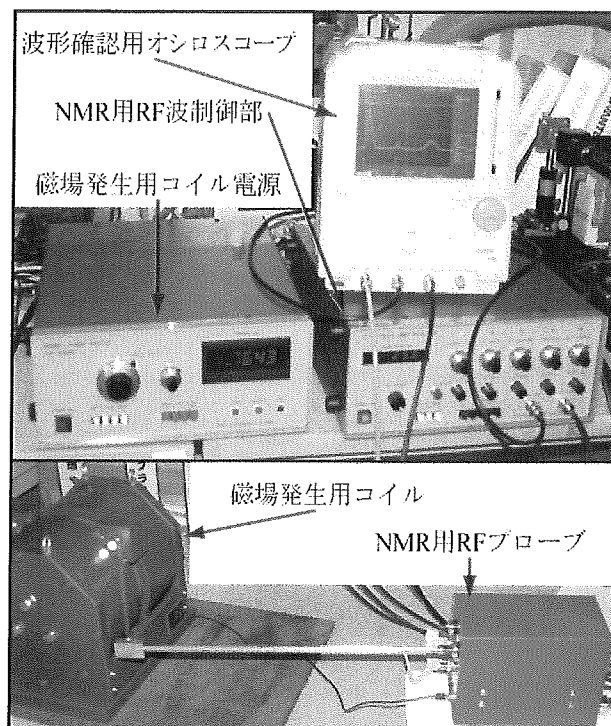


Figure 5 簡易 NMR 実験装置

D. 考察

試作したMRI信号受信デバイスは、45 mTの磁場において利用することを想定して試作したため、周波数が 1.9 MHzにおける高周波信号を受信できるデバイスとした。しかし、医療用MRIなどで主に利用されている磁場は 0.2~1.5 T程度であり、周波数も 8~70 MHz程度の範囲である。そのため、MRIでも利用できる信号受信デバイスとしての評価を今年度は行うことが出来なかった。

そこで、医療用MRIでも利用されている 0.3 Tの磁場を発生できる簡易NMR信号受信装置 (Fig. 5) を利用し、特性評価を進めることとした。この際、NMR信号の周波数が 1.9 MHzから 10 MHzに上昇するため、次年度はコイルおよびコンデンサの再設計を行い、実際のMRIでも利用できるフレキシブルな信号受信デバイスの実現を進める。

E. 結論

ガラス基板上にMEMS技術を利用してコイルとコンデンサを試作し、さらに柔軟なシリコンポリマーで保護した後に基板を除去する方法によって、カテーテルや内視鏡の側面に配置可能な、柔軟なMRI信号受信デバイスを実現した。試作したマイクロコイル及びマイクロコンデンサは、それぞれ 3.8 μ H、0.81 nFであり、このコイルとコンデンサを組み合わせることで、45 mTの磁場におけるラーモア周波数 1.9 MHzにおいて 50 Ω にインピーダンスを調整することを実現した。さらに、マイクロコイルとコンデンサを同時に作成し、フレキシブル化を行うことで円筒形の曲面へ配置可能なデバイスを実現した。

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] Tetsuji Dohi, Kiyoshi Matsumoto, Isao Shimoyama,
“The Flexible Micro Resonator for the Magnetic
Resonance Catheter,” The 13th International
Conference on Solid-State Sensors, Actuators and
Microsystems, pp. 2143-2146, Seoul, Korea, 2005.

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に関する研究

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。この手術に対する画像支援システムの開発の第一歩として内視鏡の問題点を解決していくとともに問題点を解決した。画像を処理し合成させるためのソフトウェアを開発し、そのソフトウェアを用いて手術時の内視鏡の可動域を模した環境で平面の対象を撮影し広域的な画像を作成する実験を行った。内視鏡の光学系歪み、内視鏡光軸と物体表面の傾き、距離に依存する画像の変形挙動を実験的に評価した。子宮の小孔に見立てた固定点で内視鏡を視野始点の位置で固定し垂直方向と水平方向の角度をそれぞれ変えながら格子点テストパターンを複数撮影し、上記ソフトウェアを使用して、平面上に複数の内視鏡観測パターンを配置し、テストパターン全体の再構築を試み、全体のパターンの再構築が可能であることを確認した。

A. 研究目的

重篤な胎児疾患の一つに双胎間輸血症候群がある。これは双子の胎児にたいして起こる疾患で双胎児の胎盤血管が吻合することによる双子の間での血液の不均衡によって起こる。吻合血管の特定は医師が内視鏡を用いて目測で行っているが内視鏡の視野は局所的で子宮内は混濁していて視野は不明瞭である。現在、一定の手術成績を得てはいるが、さらに胎児の生存率を上げるためにはより正確な吻合血管の特定方法が求められる。そこで本研究では、局所的な胎盤上の血管を観察した内視鏡画像を多数合成して吻合血管の特定が視覚的に明らかな広域的な画像を作成し適当な形で医師に提示するシステムの構成要素である画像処理・合成のソフトウェアの開発を本年度の目的とした。

B. 研究方法

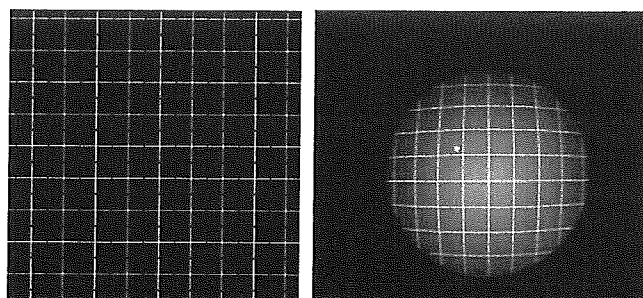
本研究で使用する画像支援デバイスは内視鏡と超音波診断装置である。画像処理手法を確立することを目的に、市販の腹腔鏡を実験装置として使用して下記の実験を行った。

内視鏡画像は視野部分と辺縁部に分けられるが、視野部以外は合成時に妨げとなるため、除去して処理を行った。次に、内視鏡画像には樽型の歪みが見られる(図1)。これをまず補正する。具体的にはあらかじめ内視鏡により格子状のテストパターンを撮影し、得られた多数の画像内格子点の光軸中心からの理想格子点への距離と撮影画像上の格子点に対応する格子点への距離を測定した。測定結果より歪み量は画像の歪み中心からの距離の多項式で表現できることが確認できたため、その関係により歪みを補正した。

また、内視鏡は子宮に開けた小孔によって動きが制限される。自由度としては内視鏡の鏡筒軸周りの回

転1自由度、小孔回りの回転2自由度、軸方向の並進1自由度の計4自由度である。よって内視鏡は常に撮影対象を曲面の法線方向から観察することはできず、物体と内視鏡の距離も一定とはならない。その結果、格子状テストパターンを斜め方向から観察した場合の画像補正を行う必要がある。斜方向からの撮影は手前が大きく、奥行き方向が小さく撮影される(図2)。平面状の格子状テストパターンシートを内視鏡と種々の距離、角度に設置し、内視鏡との距離、角度と画像変形量関係を実験的に定めた。

以上の画像補正を行うソフトウェアを作成し、子宮の小孔に見立てた固定点で内視鏡を視野始点の位置で固定し垂直方向と水平方向の角度をそれぞれ変えながら(図3)、内視鏡の光軸と対象物に対する傾き、光学系評価実験から同定した焦点からの距離ならびに格子点テストパターンを撮影し、複数の内視鏡画像を撮影した。内視鏡と対象の距離、傾き角などから画像の座標を算出し、上記ソフトウェアを使用して、平面上に複数の内視鏡観測パターンを配置し、テストパターン全体の再構築を試みた。



テストパターン 内視鏡画像
図1 内視鏡画像の樽型歪み

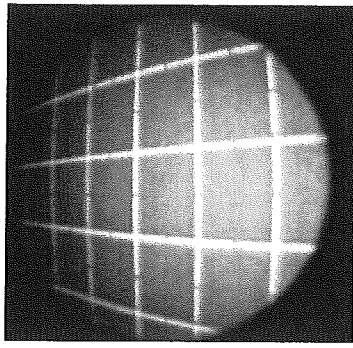


図2 内視鏡と物体面の傾きによる像の変形

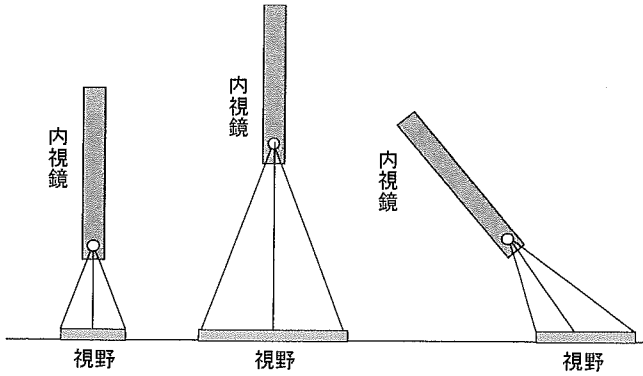


図3 距離・傾きによる視野の違い

(倫理面への配慮)

今年度は工学的な実験研究であり、倫理面への配慮は必要ない。

C. 研究結果

図5に図4示す実験装置で撮影された複数の内視鏡画像を示す。各内視鏡画像に対して樽型歪みの補正を行ったのち、物体と内視鏡光軸の傾きと焦点との距離の実測値から前述の補正を行い、重ね合わせた図を図6に示す。

角度・距離の測定誤差に起因すると考えられる重ね合わせの誤差が見られるが、格子の直交性はある程度復元されている。

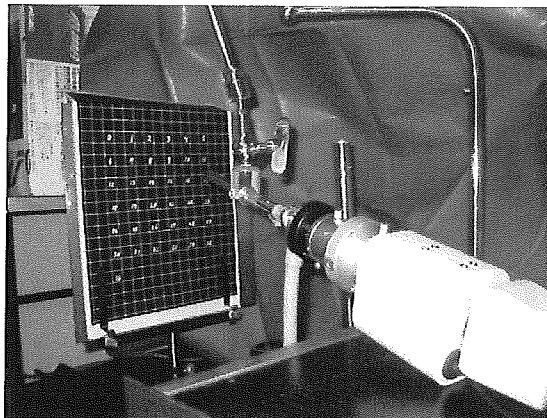


図4 実験の概要

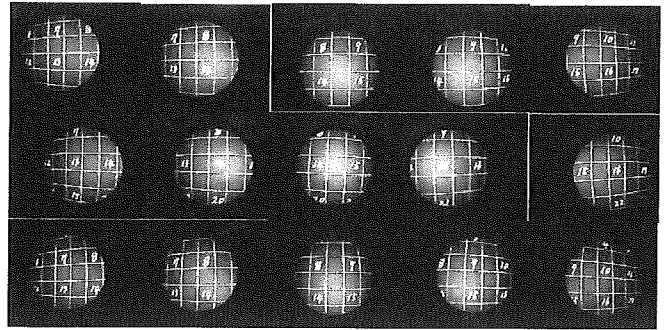


図5 内視鏡観察画像

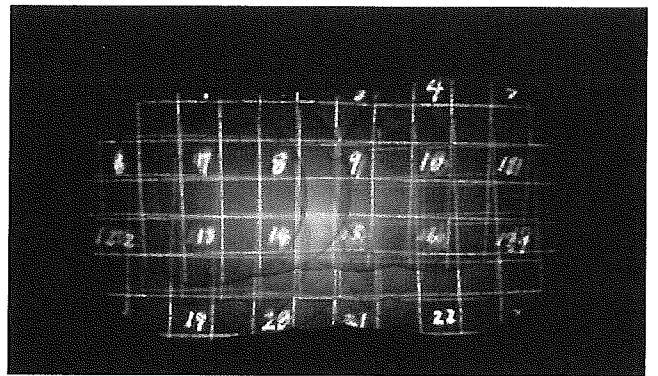


図6 テストパターン復元結果

また、胎児外科手術を想定し、簡易 X-Y ステージを組み立てステージ上に内視鏡を斜めに取り付け、胎盤モデルの画像を取得した。X 方向 (0~20 cm) に 2 cm ずつ、また Y 方向も (2~10 cm) 2 cm ずつ内視鏡を動かし、各位置から胎盤モデルの局部画像をキャプチャし、 $11 \times 5 = 55$ 枚の画像 (解像度 440×440 pixel) を取得した (図7)。画像撮影の時の内視鏡の位置を合わせて、一枚のつなぎ合わせの画像を合成した。血管の接続性・走行方向を確認した。撮影した画像を用い、画像合成ソフトを用いて一枚の画像を合成した。画像のつなぎ目がほぼ検出されず、滑らかに連続した一枚の画像として観察された (図8)。合成画像から血管の接続性・走行方向を確認した。

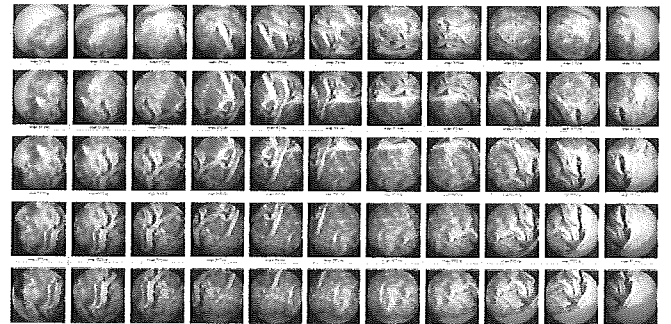


図7 内視鏡画像(11×5枚)

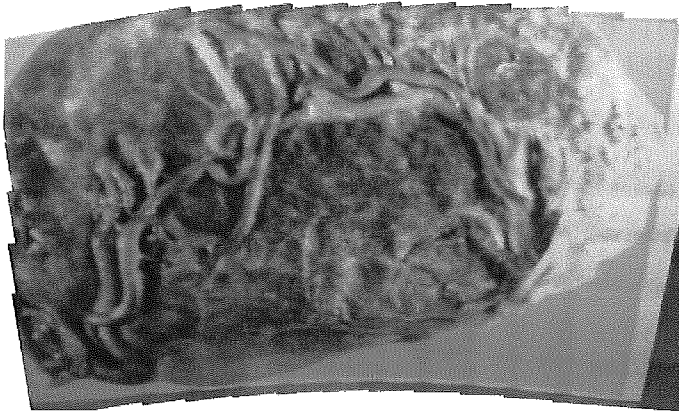


図8 合成画像

- なし
- G. 研究発表
なし
- H. 知的財産権の出願・登録状況
 - 1. 特許取得
なし
 - 2. 実用新案登録
なし
 - 3. その他
なし

D. 考察

実験結果では、重ね合わせの誤差が観察されたが、これは内視鏡の水平方向・垂直方向の角度を正確に測定できなかったということが考えられる。正確な位置情報をつかむためには、3次元光学式位置規則計測装置を用いることで解決する予定である。

今回の実験では平面状のテストパターンを対象に間欠的に観測される部分的な局所画像を樽型歪みの補正、内視鏡と物体の間の距離、物体面との傾きを考慮して、物体上のパターンを再構成することを試みた。ここで用いたアルゴリズムは平面だけではなく曲面上のパターンについても原理的には適応可能であるので、3次元超音波装置で観測される胎盤の表面データと、光学式3次元光学式位置計測装置により計測可能な、内視鏡の位置・姿勢、超音波画像との位置姿勢・関係から、3次元超音波画像計測装置で計測される胎盤表面モデル上に内視鏡画像を貼り付けて重ね合わせていくソフトウェアへ応用することが可能である。

一方斜方向からの撮影時において画像の奥行き方向遠距離のものを見ていることから、画像の鮮明度が劣化し、輝度値が小さくなり、信号対雑音成分比が小さくなるため、合成に影響が出た。このような実際の撮影条件の影響についても今後検討する必要がある。

E. 結論

局所的な胎盤上の血管を観察した内視鏡画像を多数合成して吻合血管の特定が視覚的に明らかな広域的な画像を作成し適当な形で医師に提示するシステムの構成要素である画像処理・合成のソフトウェアの開発を行った。平面状のテストパターンを対象に間欠的に観測される部分的な局所画像を樽型歪みの補正、内視鏡と物体の間の距離、物体面との傾きを考慮して、物体上のパターンを再構成することを試みた。テストパターン全体の再構築が可能であることを確認した。

F. 健康危険情報

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

分担研究者 伊関 洋 東京女子医科大学 先端生命医科学研究所

研究要旨 双胎間輸血症候群において臍帯・胎盤上の血管のレーザによる処置を行う場合に、胎盤損傷による大出血を回避するために胎盤への手術器具の接触を防止するには、卓越した医師の技量が必要とされる。本年度本研究では、術野内の危険領域への距離や腫瘍摘出術等での残存病変量を3次元モデルを用いて等高線化(術者視線方向すなわち手術顕微鏡・内視鏡方向からの危険領域までの距離を示す)し、危険領域への距離に応じて術者に適切な位置情報をわかりやすく提示するための新しい手術ナビゲーションシステムモジュール「近接覚ナビゲーション」の開発を行った。

A. 研究目的

胎児外科手術においてもっとも大きな問題点となる点は、その作業空間の狭さと子宮内組織の脆弱さである。双胎間輸血症候群において臍帯・胎盤上の血管のレーザによる処置を行う場合に、胎盤損傷による大出血を回避するために胎盤への手術器具の接触を防止するには、卓越した医師の技量が必要とされる。

本年度本研究では、術野内の危険領域への距離や腫瘍摘出術等での残存病変量を3次元モデルを用いて等高線化(術者視線方向すなわち手術顕微鏡や内視鏡方向からの危険領域、正常組織までの距離を示す)し、危険領域への距離に応じて術者に適切な位置情報をわかりやすく提示するための新しい手術ナビゲーションシステムモジュール「近接覚ナビゲーション」の開発を行った。

B. 研究方法

本ナビゲーションモジュールを開発するに当たり、ベースシステムとしては脳神経外科手術において臨床研究を行っているPRSナビゲーションシステム(東京女子医大・東芝・インフォコム)を用いた。本システムは赤外線を用いた光学式3次元位置計測装置Polaris(Northern Digital Inc, Canada)をセンサとして、患者位置・術具位置・医用画像をレジストレーション(座標統合)し、画像上での術具の位置を示す。

本モジュールではまず、関心領域セグメンテーションデータを読み込み、画像空間と術野空間とのレジストレーションを行ったナビゲーションシステム上において、セグメンテーションされた腫瘍データ V_0 の輪郭面 S_0 状の各点 P_n と視点 C とを結んだベクトル空間を計算により求める。次に各ベクトルを指定量 Δt だけ短縮し、ベクトル先端を結んだ面 $S_{\Delta t}$ を作成する。この2つの面で囲

まれた領域 $V_{\Delta t}$ は、術者視線方向から考えて、腫瘍輪郭部からの距離が Δt 以下の領域となる(Fig. 1)。

Δt を5mm、10mm、20mmとして計算した $V_{\Delta t}$ 群および V_0 とのそれぞれの差分をとることにより、関心領域輪郭からの距離5mm以下の領域、5mm以上10mm以下の領域、10mm以上20mm以下の領域、20mm以上の領域のボリュームデータが作成される。これらをカラーマップしナビゲーション画像上に重畳することで、作業進捗度および作業重要度(関心領域端にどれくらい近いのか)を直感的かつ定量的に医師に提示することが可能となる。

以上の方法により作成したカラー等高線作成機能を備えたナビゲーションシステムにおいて、近接覚マップ作成速度を複数のデータ・視点位置を指定して測定した。また、ファントム実験および臨床において試用し、その使用感及び有用性について定性的に評価した。(Fig. 2、3)

臨床での試用は、ナビゲーションシステムの開発・臨床応用の実績のある脳腫瘍摘出術をターゲットとし、術中MRIデータにより取得された脳腫瘍と正常組織との境界までの距離を等高線的に細分化して提示し、正常組織までの近接覚を提示した。視点 C の座標は顕微鏡レンズ中心とし、ナビゲーションシステム用反射球マーカツールを取り付けた治具を作成しこれを顕微鏡に取り付けることにより取得を行った(Fig. 4)。

(倫理面への配慮)

本近接覚提示モジュール付ナビゲーションシステムの臨床応用においては、患者個人情報には厳重な管理を行い、研究結果発表の場合に特定個人が認識されないよう配慮を行った。またナビゲーション手術に関しての十分なインフォームドコンセントと書面による承諾の元に臨床治療を行った。