

良する必要があり、術具先端に搭載することを考えると精度を保ちつつより小型にする必要があることが分かった。

結果から、インダクタンスを直列分解したトラッキングコイルによって、3点の同時計測、すなわち、姿勢計測が可能であることが示された。計測精度は光学式位置計測装置と同程度であることが示された。

腹腔鏡下手術支援用 CCD 搭載型屈曲レーザ鉗子マニピュレータの改良を行った。レーザ出力の増大と、滅菌を考慮した機構の実現、再現性の高い動作が確認された。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

- 1) 野口雅史, 青木英祐, 小林英津子, 大森繁, 村垣善浩, 伊関洋, 佐久間一郎: 脳外科用レーザ手術装置のための小型オートフォーカスシステムの開発: 日本コンピュータ外科学会誌, 第6巻第4号, pp483-489, 2005

2. 学会発表

- 1) Takashi Suzuki, Youichi Katayama, Etsuko Kobayashi, Ichiro Sakuma. Improvement of Compact Forceps Manipulator using Friction Wheel Mechanism, Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery, vol. 7, no. 2, pp. 138-141, 2005
- 2) E.Aoki, T.Suzuki, E.Kobayashi, M.Hashizume, I.Sakuma: Desigh and Evaluation of a Master-Slave System with Portability and Flexibility of setting, Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery, vol. 7, no. 2, pp. 215-217, 2005 The 1st Asian symposium on Computer Aided Surgery-Robotic and Image guided Surgery-;, 2005, Tsukuba:
- 3) M.Noghichi, E.Aoki, E.Kobayashi, S.Omori, Y.Muragaki, H.Iseki, I.Sakuma: Development of a Compact Automatic Focusing System for A neurosurgical Laser Instrument, Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery, vol. 7, no. 2, pp. 188-191, 2005 (1st Asian symposium on Computer Aided Surgery-Robotic and Image guided Surgery-2005: Tsukuba)
- 4) Takashi Suzuki, Youichi Katayama, Etsuko Kobayashi, Ichiro Sakuma. Compact Forceps Manipulator for Laparoscopic Surgery. Proceedings of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2005),

pp.3732-3737, Edmonton, Alberta, Canada, 2005

- 5) Takashi Suzuki, Youichi Katayama, Etsuko Kobayashi, Ichiro Sakuma. Compact Forceps Manipulator using Friction Wheel Mechanism and Gimbals Mechanism for Laparoscopic Surgery. Proceedings of 8th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI2005), pp.81-88, Palm Springs, California, USA, 2005
- 6) 青木 英祐, 野口 雅史, 洪 在成, 小林 英津子, 中村 亮一, 丸山 隆志, 村垣 善浩, 伊関 洋, 佐久間 一郎. 脳神経外科手術における異種環境統合プラットフォームの開発と評価, 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, 千葉, pp.89-90, 2005
- 7) 青木 英祐, 野口 雅史, 洪 在成, 小林 英津子, 中村 亮一, 丸山 隆志, 村垣 善浩, 伊関 洋, 佐久間 一郎. 脳神経外科手術における術中情報統合システムの開発 第 2 報 ミドルウェアを用いた通信コンポーネントの開発, ロボティクスメカトロニクス講演会 2006(ROBOMECH2006), pp.2P1-N-130, 東京.
- 8) Masafumi Noguchi, Eisuke Aoki, Etsuko Kobayashi, Shigeru Omori, Yoshihiro Muragaki, Hiroshi Iseki, Ichiro Sakuma, Development of a Compact Automatic Focusing System for a Neurosurgical Laser Instrument, The 1st International Conference on Complex Medical Engineering, pp.74-79, Takamatsu, Japan, May, 2005
- 9) 野口雅史, 他: 精確な位置補正に基づく 5-ALA 誘導蛍光を用いた局所的脳腫瘍同定システムの開発: 第 14 回日本コンピュータ外科学会大会抄録集, pp195-196, 2005
- 10) 吉田大樹, 他: 5-Aminolevulinic Acid 誘導蛍光による術中脳腫瘍同定のための蛍光局所計測法に関する研究: 第 14 回日本コンピュータ外科学会大会抄録集, pp97-98, 2005
- 11) 鈴木孝司, 片山洋一, 小林英津子, 佐久間一郎. 多機能鉗子用小型マニピュレータの開発 (第 3 報) ~新試作機を用いた位置決め精度評価~. 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.139-140, 千葉, 2005
- 12) 山下紘正, 松宮潔, 正宗賢, 小林英津子, 佐久間一郎, 廖洪恩, 橋爪誠, 土肥健純: 多自由度屈曲型バイポーラ電気メス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：
141-142, 2005

- 13) 大木智之, 西田洋平, 金田道寛, 福与恒雄, 小西晃造, 橋爪誠, 小林英津子, 佐久間一郎. 屈曲型 CCD 搭載レーザ鉗子の開発. 第 23 回日本ロボット学会学術講演会. pp.3J12. 2005
- 14) 大木智之, 西田洋平, 金田道寛, 福与恒雄, 小西晃造, 橋爪誠, 小林英津子, 佐久間一郎. 腹腔鏡下手術支援用 CCD 搭載型屈曲レーザ鉗子マニピュレータシステムの開発. 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.137-138, 千葉, 2005
- 15) 小野木真哉, 佐久間一郎, "MRI アクティブトラッキングによる直列分解コイルを用いた小型受信コイルの位置・姿勢高速計測に関する研究" 第 33 回日本磁気共鳴医学会大会, p.189, 2005.
- 16) 小野木真哉, 佐久間一郎, 西村博: MRI による直列コイル位置・姿勢計測方法とその評価、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.169-170, 2005

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

OpenMRI手術室における手術ロボティクス開発に関する研究

(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 OpenMRI 手術室での手術ロボティクス及び情報誘導下手術に関しての基盤的要素開発研究を行った。具体的には、1)制限の多い手術室環境での手術機器の形状・配置の最適化を目標として、本年度は3次元CADを用いた手術場での機器配置検討、2)新たなロボティクスの構成要素として、MRI対応レーザ手術ロボットシステムの開発・試作を行った。その結果、1)複数手術機器のデジタル形状・機能モデルを元に、最適配置を行うプラットフォームを完成し、光学式3時源一計測装置を搭載する無衛陶の最適配置シミュレーションが可能となった。また2)5ALAによる腫瘍局在同定機能とナビゲーションシステムとの連携機能を搭載した治療戦略デスク統合型手術ロボットシステムのプロトタイプを開発し、腫瘍マーカ局在部のみを自動選択し細胞蒸散することが可能となった。

A. 研究目的

2000年3月に本学に開設したインテリジェント手術室(OpenMRI手術室)では現在までの200例を越す臨床経験と、それに伴って来た術中情報可視化・統合技術により、悪性脳腫瘍手術において平均摘出率及び全摘率の向上という顕著な臨床的知見を得ることが出来た。また、精緻な腫瘍情報の可視化の成功に伴い、その情報に見合う精緻な手術手技の確立が新たに必要不可欠となった。

精緻な医療情報を元に精緻な治療を行う精密誘導手術(Precision-guided Surgery)を実現する新たな手術ロボットを開発するに当たり、我々は以下の点に着目した。

1) 手術ロボット・機器の形状・配置の最適化

ロボットの治療上の機能だけでなく、手術場での空間的制約(物理的な空間の制限)、機能的制約(MRIの高磁場・放射線環境による制限)を鑑みた上での手術ロボット設計が不可欠である。また、精密誘導手術を支援する様々な機器を手術室に導入するにあたり、その機能を損なうことなく既存の機器・人員との干渉を防ぐための最適配置を検討する必要がある。

2) 手術マニピュレータの多機能・高機能化、治療戦略デスクとの統合

現在の外科的手技にとらわれない、ロボットならではのAdvanced Handの開発が必要である。また、手術ロボットを単なる「マニピュレータ・高機能メス」でなく、外界からの入力に対し自己の判断・変換に基づいて適切な出力を実

現するという「ロボット」としての特性を持つものとして完成させるためには、術中の術や情報・診断情報の統合に基づく手術戦略構築システム(戦略デスク)との統合が必要である。

本年度の研究においてはこれらの要素技術検討を通じ、新たな手術ロボット開発に必要な技術基盤の確立を目指した。

B. 研究方法

目的にあげた2要素に対し、具体的に以下の方法で研究を行った。

1) 手術ロボット・ナビゲーションシステム用カメラの形状・配置の最適化
-3D CADを用いた手術機器の4次元配置最適化システムの構築-

狭く限られた術空間において適切な位置に機器を配置し円滑に手術を遂行することは、精密誘導技術の確立と安全性の担保において非常に重要である。手術機器が執刀医に適した配置ならば、手術のパフォーマンスを高水準に高めることが容易になる。逆に不便な配置ならば、機器のパフォーマンスを十分に生かすことができないことはもちろん、常に機器に対する配慮を必要とされるため執刀医自身のパフォーマンスをも低下させることが考えられる。しかしながら、現在手術中にどこの位置にどの機器を配置すればよいかについては術者の経験によるところが大きく、配置最適化の手法につい

ての見当はされていない。

我々は手術機器の最適位置を定量的に求めるために3D-CADを用いて手術現場における器具の配置をシミュレートする方法を考えた。本研究事業では特に、手術ロボットシステムと手術ナビゲーションシステムを対象とし、形状・配置の最適化を行うシステムの研究開発を行う。

前年度に引き続き3次元CAD(Computer Aided Design)をベースに、本学インテリジェント手術室における機器の配置検討するシステムの構築を行った。本年度は既存の機器は位置検討を行い、将来の手術ロボット形状・配置最適化への応用可能性を図った。

本年度は特に、手術ナビゲーションシステムの光学式3次元位置計測装置の最適化のための基礎的シミュレーションを行った。手術ナビゲーション運用におけるひとつの大きな問題は、位置計測装置の配置が不適切なために、本装置の位置計測可能範囲と計測対象の運動空間(ここでは術具の移動範囲)が一致せず計測脱落を起こしたり、位置計測方向が不適切なために術具角度によって計測脱落が頻発したりするという、測定系の問題である。この問題を解決するためには、

1. 手術空間を確実に捉え、かつ術者や機器の干渉の少ない場所に測定装置を設置する
2. 機器・人員の配置といった周辺環境に応じ測定装置の設置位置・角度を定量的に提示する

ことが必要である。

そこで我々は、術野上に位置し、常に作業領域中心に向かって位置を最適化している無影灯に着目し、無影灯にナビゲーションシステム用位置計測装置を統合することを考案した。今年度本研究では、2台の無影灯に位置計測装置を設置した状態を想定し、2台の無影灯の照明範囲(≒位置計測可能範囲)データから無影灯の至適位置をシミュレーションにより求めた。

2) 手術マニピュレータの多機能・高機能化 -腫瘍蛍光診断・MRIナビゲーション情報に基づく手術戦略による自動治療機能の開発-

脳外科手術における悪性脳腫瘍の切除率向上を目指し、波長 $2.8\mu\text{m}$ マイクロレーザを用いたコンピュータ制御レーザ手術システムの試作検討を行ってきた。これまでの実験において、周辺組織への熱ダメージを抑えた蒸散エッチングが、脳表上の任意の指定領域へ精度良

く行えることを確認している。また本装置の特長は、中赤外波長領域の低出力レーザ光をレンズで集光することによって実現できるピンポイントな脳組織蒸散特性であるが、一方、大きな凝固能力は期待できないため、出血のコントロールに課題を有していた。昨年度研究においてはデフォーカシングによる凝固モードを新機能として開発し、血管を選択的に脱血凝固し、血流をとめる事に成功した。

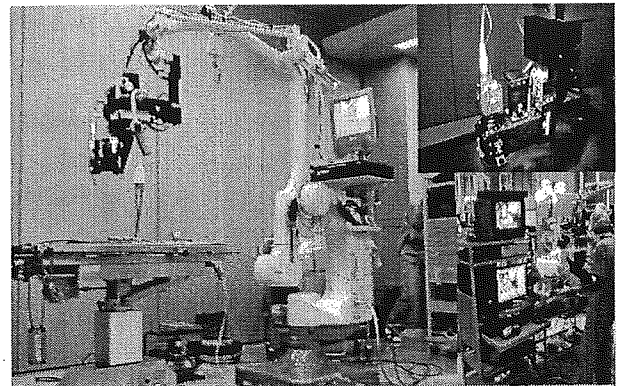


Fig.1 OpenMRI対応レーザ手術ロボットシステム
左: 全体図。MRI対応顕微鏡架台にレーザユニット・画像ユニットを備える。右上: 昨年度製作したレーザ・AFユニット。
右下: レーザ手術ロボットコントロール装置。

今年度本研究では、術中診断情報により策定された治療戦略に基づき、腫瘍領域のみを選択的に自動アブレーション実行する、治療戦略デスク統合型レーザ手術ロボットシステムの開発を行った。

本研究で用いた術中腫瘍領域同定法は、5-Aminolevulinic acid(5-ALA)経口投与方法である。5-ALAは体内で代謝後蛍光物質Proto-Porphyrin IX(PpIX)に変化し、紫外光励起により赤色蛍光を生じる。この系は腫瘍選択性を持ち、正常組織よりも腫瘍組織において早い時間での蛍光発生が起こる。脳腫瘍外科臨床においては5-ALAの経口投与後4時間程度で腫瘍からの蛍光が認められる。

5ALA経口投与方法により発生した組織からの蛍光を元に、腫瘍の局在位置情報を取得するために、PpIX励起用405nm半導体レーザと蛍光取得用ファイバをレーザ手術ロボットのステージ部に取り付け、術野スキャン時に腫瘍局在を確認する機能(腫瘍局在自動診断モジュール)を開発した。また、腫瘍局在蛍光診断器(分光測定器)、光学式位置測定装置、MRIナビゲーションシステム、レーザ手術ロボットシステムは独立した手術支援システムであるがこれをミドルウェアを用いて統合し、蛍光診断・MRI診断に基づく治療戦略を医師と手術ロボットシ

システムに提示する治療戦略デスク統合型手術ロボットプラットフォームを構築した。

本自動診断モジュールを搭載したレーザー手術ロボットの機能検証を行うためのInvivo実験を行った。あらかじめ5ALAを静注により投与した健常豚において、開頭後大脳皮質を一部硬膜で覆った状態にした。このとき、健常豚においても皮質組織においてPpIX由来の蛍光を呈するが、硬膜は蛍光を発しない。この状態において、自動診断モジュールでのPpIX含有組織（皮質）と含有しない組織（硬膜）を自動判別し、皮質のみをレーザー蒸散可能かについて定性的に評価を行った。

(倫理面への配慮)

1) に関して：本年度は患者にかかわるデータを用いず、機器の形状情報のみを用いた配置計画検討について行った。

2) に関して：動物実験を行うに際しては、実験動物に過度の苦痛を与えないよう配慮し、また1頭の対象動物において最適・最大の実験結果が図られるよう、他の研究事業の動物実験と並行して行った。

C. 研究結果

1) 手術ロボット形状・配置の最適化

-3D CADを用いた手術機器の4次元配置最適化システムの構築-

東京女子医科大学インテリジェント手術室（術中MRI導入手術室）をモデルとした1例を示す。3D-CADで作成した無影灯は実際の無影灯と同じ自由度で動かすことが可能である。これより3D-CADにおける2台の無影灯の配置位置の検討結果を元に実際のインテリジェント手術室内の無影灯を配置した。その結果、2台の無影灯により遮蔽なく術野を照明する領域の検索が可能となった。(Fig. 2, 3)

2) 手術マニピュレータの多機能・高機能化

-腫瘍蛍光診断・MRIナビゲーション情報に基づく手術戦略による自動治療機能の開発-

図に本年度開発したレーザー手術システムヘッド部を示す。CCDカメラ、脳表位置計測用ガイドレーザー、組織蒸散用レーザーに加え、PpIX励起用レーザー、蛍光計測ファイバを備えている。(Fig. 4)

本システムで一部硬膜で遮蔽した脳表を自動蒸散した結果、PpIXの検出されない硬膜部にレーザーを照射することなくPpIXの存在する脳

表のみを蒸散することが出来た。(Fig. 5)

また、腫瘍局在蛍光診断器(分光測定器)、光学式位置測定装置、MRIナビゲーションシステム、レーザー手術ロボットシステムをミドルウェアを用いて位置・時間情報をベースに統合した結果、ナビゲーションシステム上で蛍光診断の結果がリアルタイムで確認することが出来た。(Fig. 6)

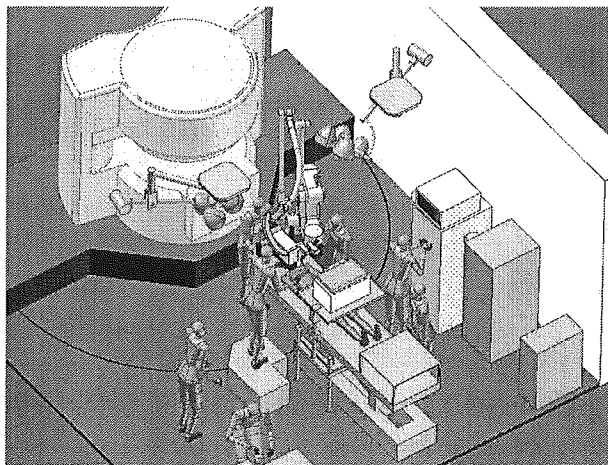


Fig. 2 OpenMRI手術室内機器・人員の3Dデジタルデータ化

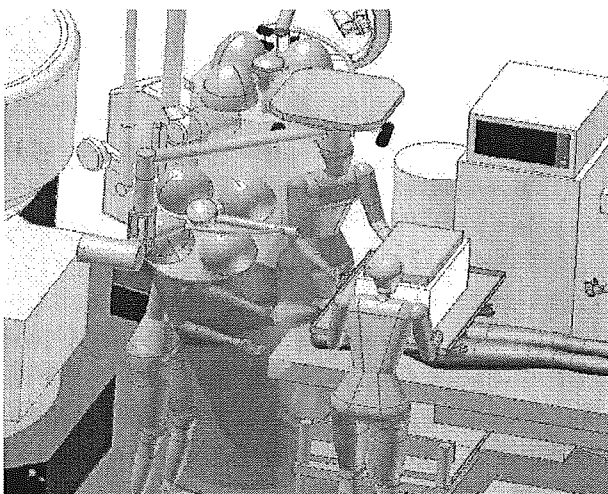


Fig. 3 3D-CADによる无影灯照明領域(黄色円筒部分)の最適配置シミュレーション

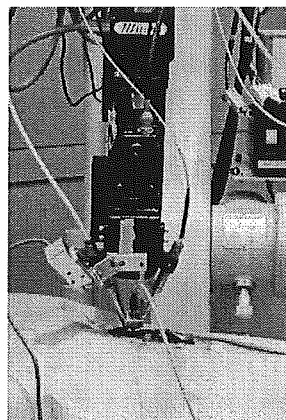


Fig. 4 レーザ手術ロボットシステムヘッド部。励起用レーザーと蛍光測定用ファイバを新たに搭載している。

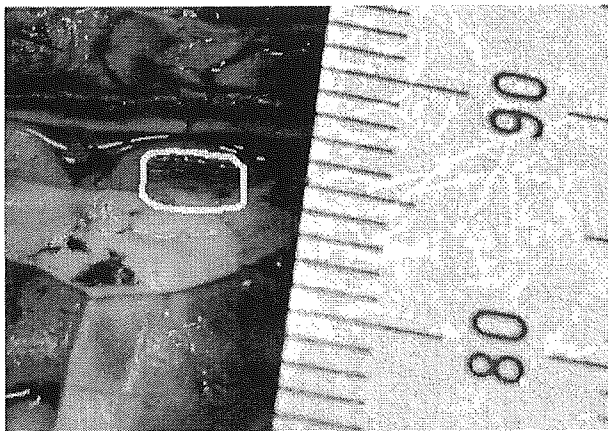


Fig.5 腫瘍局在自動診断下でのレーザー照射結果。黄色線は操作者による蒸散部位指令領域。硬膜上にレーザーを照射していないことが確認できる。

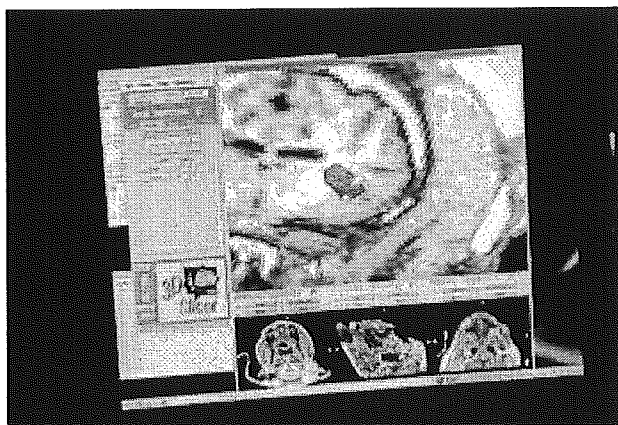


Fig.6 診断情報統合システムにおけるナビゲーションシステム画面。3次元リスライスMRI画像データ上にPpIX診断結果(球、蛍光郷土を色濃度で示す)を統合している。

D. 考察

1) 手術ロボット形状・配置の最適化

-3D CADを用いた手術機器の4次元配置最適化システムの構築-

手術場という特殊環境における機器・人員の最適配置の検討は、安全で効率のよい高品位の手術を行ううえで非常に重要である。特に本事業では術中にOpenMRIを始めとする多次元・多プロトコルの医用画像・情報を取得し、手術ロボットを用いて行う新しい手術の創出を目標としていることから、現状の手術室よりもさらに多くの空間的・機能的制限が存在することは明白である。先端技術を駆使した手術においても高い安全性・信頼性を得る上で、本研究の重要性は高い。

3D-CADを用いることによって2台の無影灯を開頭部を照らし出せる配置位置をわかりやすく提示することが出来た。無影灯やナビゲーションシステム用カメラなど、実際の手術室において無影灯を含む複数台の配置関係が使用内容に大きく影響を及ぼす機器の最適配置を選

定できることがわかった。

今後の研究課題として、本システムにより得られる定量的な配置位置・姿勢を正確に手術機器へ反映させるための、機器側の位置あわせ装置の準備が必要である。また手術ロボットの形状・配置の最適化を目標としているが、組織・臓器の特性を考慮した上で、術野確保・アプローチを含む手術手技の4次元CAD解析についても検討を行うことで、手術ロボットの開発だけでなくロボット手術の新しい術式についても考察することを考えている。

2) 手術マニピュレータの多機能・高機能化

-OpenMRI対応レーザー手術ロボットシステムの開発・試作-

今年度の研究開発により、手術ロボット自身に診断機能を持たせ、自動診断から正確な組織蒸散を実行するシステムの可能性が提示された。

現在本システムでは、それぞれプラットフォームの異なる機器を、システム変更の手間を出るだけ避けた上でリアルタイム名情報統合を実現するために、ミドルウェアを用いての統合を行った。一方で、手術ロボットへの蒸散エリア指令系と診断情報提示系はシステムとしては統合されているものの、現在はそれぞれが異なるディスプレイ上に提示されているためにロボットへの医師からの指令は術野映像を中心に別のMRIナビゲーション&蛍光診断結果ディスプレイを参照しながら行っている。医師が治療計画を指令に変換する際に、統合された術野・診断情報を元に正確な指令を実行させるためには、表示系の統合も必要である。この点に監視更なる検討を進めていく必要がある。

E. 結論

本年度は以下の4つについて研究を行い、以下の結果を得た。

- 1) 3D CADを用いた手術機器の4次元配置最適化システムのプロトタイプを構築し、OpenMRI手術室の手術機器の3次元データ作成を行った。順次本データに現場での移動状況・術者・助手の情報を統合し、術場の4次元解析および手術ロボットを含む手術機器の最適配置・形状の解析を行う。
- 2) OpenMRI対応レーザー手術ロボットシステムの新機能として腫瘍蛍光診断機能を搭載し、腫瘍局在部のみを選択的に蒸散可能な自動診断機能搭載型手術ロボットシ

ステムのプロトタイプを開発した。また
診断結果・ナビゲーションシステム・ロ
ボットを統合した治療戦略デスク統合型
レーザ手術ロボットシステムを構築した。

G. 研究発表

1. 論文発表

中村亮一、大森繁、村垣善浩、佐久間一郎、伊
関洋、脳腫瘍の最大摘出を実現するマイクロ
レーザ手術ロボットシステムの開発、電気学会
研究会資料 BMS-05-26~32:9-14、2005

2. 学会発表

青木英祐、清水一秀、Ali gooya、洪在成、小林
英津子、波多伸彦、中村亮一、丸山隆志、村垣善
浩、伊関洋、佐久間一郎、脳神経外科手術におけ
る術中情報統合システムの開発、日本機械学会
ロボティクス・メカトロニクス講演会
2005 (ROBOMECH2005)、神戸、pp. 205、6月9日~11
日、2005

野口 雅史、青木 英祐、清水 一秀、小林 英津
子、佐久間 一郎、村垣 善浩、伊関 洋、精密な
位置補正に基づく5-ALAによる局所的脳腫瘍同定
システムの開発、第14回日本コンピュータ外科学
会大会、千葉、p195-196、11月19-21日、2005

安藤 隼人、植松 美幸、森田 篤、上杉 繁、中
村 亮一、伊関 洋、西澤 幸司、手術室内におけ
る複数台機器の最適配置の検討、第14回日本コン
ピュータ外科学会大会、千葉、11月19-21日、
p199-200、2005

青木 英祐、野口 雅史、洪 在成、小林 英津子、
中村 亮一、丸山 隆志、村垣 善浩、伊関 洋、
佐久間 一郎、脳神経外科手術における異種環境
統合プラットフォームの開発と評価、第14回日本
コンピュータ外科学会大会、千葉、11月19-21日、
p89-90、2005

H. 知的財産権の出願・登録状況
なし

新たな手術用ロボット装置の開発に関する研究

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>腹部外科手術支援を目的とした柔剛可変型内視鏡手術ロボットおよび、前立腺がん外科的治療支援ロボットの開発を行う。また、これら手術ロボットのMRI誘導下で位置制御を目標としてMR対応化に関する検討も行う。<背景>生活習慣の変化による胃がん、前立腺がんの増加が報告されており、低侵襲手術へのニーズも高まってきている。さらに、従来の開腹手術による摘出術に対して、手術時間の低下、合併症の低減、さらには術後QOLの向上などの余地は残されており、これらは内視鏡を中心とした手術デバイスの高度化、さらには手術ロボットの導入で実現可能である。<目的>本年度の分担研究の目的は主として以下の4項目から構成される。(目的1)多節スライダ・リンク機構を搭載した手術ロボットデバイス群の開発。(目的2)手術デバイス誘導用多関節外套管の開発。(目的3)前立腺がん治療デバイス操作用マニピュレータの開発。(目的4)手術用デバイス・マニピュレータのMRI対応化。

A. 研究目的

本年度の研究目的は主として以下の4項目である。

A.1 多節スライダ・リンク機構を搭載した手術ロボットデバイス群の開発

より低侵襲な腹腔鏡下外科手術の実現のため、著者らはこれまでに2自由度の屈曲機構と1自由度の把持機構を有する多自由度屈曲鉗子マニピュレータを開発してきた。このマニピュレータは腹腔内で自由な方向にアプローチを行なうことができ、臓器の持ち上げや組織・針・糸の強固な把持が可能である¹⁾。しかしエンドエフェクタとしては把持鉗子機能しか持たないため、多種多様な手術手技への対応は難しい。そこで多自由度を有するマニピュレータのエンドエフェクタに多機能化を加えることにより、術中に使用する術具、腹壁に挿入するポートの本数を低減し、また、術中に術具を交換することの煩わしさを解消し、手術手技の安全性や効率を高めることを目的とする。

あらゆる腹腔鏡下外科手術においては、患部周辺組織の血管処理を安全に、かつ迅速に行なうことが重要である。現在、術中の血管処理には電気メスが頻繁に用いられているが、電気メス機能に多自由度を加えることにより、無理な方向からの処理を防ぎ、また、組織の剥離や凝固、閉塞といった作業を効率よく行なうようになると思われる。

本研究では、多自由度鉗子マニピュレータに電気メス機能を追加することで、多自由度屈曲、把持鉗子、電気メスを併せ持つことによる有用性の評価を

行なう。特に今回は予備実験として、In vivo 実験にて生体における基本的な手術手技能力の評価を行なったので報告を行なう。

A.2 手術デバイス誘導用多関節外套管の開発

近年の内視鏡下外科手術の発達により多くの手術が開腹手術に置き換わって行われるようになってきている。しかし、この内視鏡手術の問題点として、多くの器具が直線的であるため、気腹、吊り上げ等何らかの方法で術野を確保する必要がある。また体内深部に対するアプローチは困難である。このような問題を解決するためには体内の重要臓器を迂回して侵入することが可能な柔軟なマニピュレータが必要であり、現在開発研究が行われている¹⁾。このような柔軟なマニピュレータは途中の重要な組織を傷つけずにアプローチすることが可能であるが、一方で器具自体の体内への挿入、術野への侵入が困難である事が問題となる。このため、あらかじめ器具の進入経路を確保するための機器の開発が求められる。

本研究では進入経路を確保するための機器として、柔剛可変型の可撓性外套管を提案する。これは柔らかい状態で体内へ侵入し、体内で任意の形状で硬くなる。それにより後に手術器具が通過するための経路を確保することが可能となる。本報では提案する外套管が実際に柔と剛の切り替えるための機構を開発し、試作を行った。そして柔と剛に関するそれぞれの特性、及び切り替えに関する評価実験を行ったので報告する。

A.3 前立腺がん治療デバイス操作用マニピュレータの開発

A.3.1 前立腺がん熱凝固治療用集束超音波プローブ位置決め操作のための5節リンク式マニピュレータの基礎的開発

近年、非侵襲的前立腺がん治療法として集束超音波照射に関する研究が盛んである。この治療法においては、複数の圧電素子から成り (phased array)、焦点位置を電子走査で移動しうる超音波プローブを用いたがん焼灼の試みも行われている。本研究では、広い範囲の前立腺がん焼灼目指し、phased array 型超音波プローブを搭載し移動し得るマニピュレータを開発し、基礎的評価を行った。

A.3.2 前立腺がん凝固後切除マニピュレータの基礎的開発

前立腺がんは欧米において男性悪性腫瘍の中で最も発生率が高く、日本においても年々発生率が上昇している。現在行われている根治療法では尿失禁や性機能障害などの合併症があり患者の QOL に影響を与えている。合併症は前立腺周辺の筋肉や神経束の損傷に起因しており、合併症の解決にはこれらの損傷を回避することが不可欠である。解決に向けた試みとして前立腺周辺部と干渉しない経尿道的前立腺摘除術(TURP)を利用することが検討されているものの、がん細胞の飛散によって転移が引き起こされることが問題となっている。

そこで本稿では TURP に凝固機構を付加することによって飛散による問題の解決を目指し、前立腺がんのための前立腺切除用マニピュレータの開発を目的とする。

A.4 手術用デバイス・マニピュレータの MRI 対応化

垂直磁場型 MRI に他王した腹部穿刺ロボットを開発し、ナビゲーションシステムの構築・統合を行い、基礎的評価を行うことを目的とする。

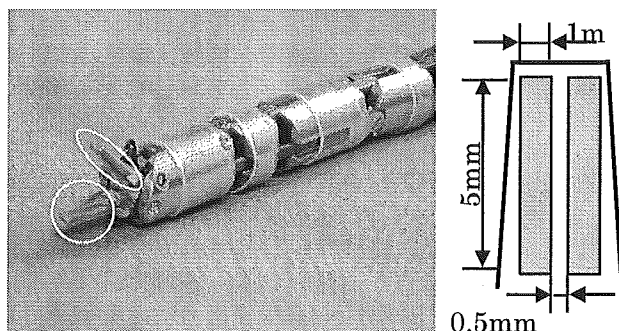


Fig. 1-1 Shape of bipolar electrode on the Multi-DOFs forceps blades. Material of electrode is nickel overlaid with gold.

B. 研究方法

B.1 多節スライダ・リンク機構を搭載した手術ロボットデバイス群の開発

(1) バイポーラ電極の搭載

バイポーラ電気メス機能の搭載には、最大で 0.85 [kgf] の把持力を有する多自由度屈曲マニピュレータを用いる。電気メスによる組織の焼灼能力は、把持力に依るところが大きいため、この強固な把持力は有利に働くと考えられる。鉗子部に取り付ける電極としては、管状組織の閉塞に最適なバイポーラ電極形状についての研究²⁾や、血管閉塞用として開発された LigaSure™ (Valleylab, USA)³⁾を参考にし、Fig. 1-1 で示す形状に決定した。電流密度を高めるため、1mm×5mm×0.1mm の電極を 0.5mm 間隔で 2 列並べ、鉗子部の把持面へと貼付を行なった。

(2) システム構成

Fig. 1-2 に本電気メスマニピュレータのシステム構成を示す。基本的な構成は従来のマニピュレータのものを踏襲している。また、電気メスのコアギュレータには瑞穂医科工業株式会社の SS-2100 を用い、焼灼の ON/OFF にはフットスイッチを用意した。

B.2 手術デバイス誘導用多関節外套管の開発

(1) 柔剛可変機構

提案する外套管は一定間隔で関節を有しており、それぞれの関節が自由に回転できる。それにより外套管全体としてさまざまな形状を取ることが可能となる。任意の形状でその形状を維持するための剛性を発生させる方法としては、スライダリンク機構を用いた。それぞれの外套管小片の中にスライダが存在し、関節ごとの回転角度に連動して運動する (Fig. 2-1a)。このスライダにはラックがついており、外套管小片内に組み込まれたストッパーのラックとかみ合うことでロックされ、全体として形状が固定される (Fig. 2-1b)。このストッパーを動かす方法として、空気圧による駆動方法を用いた。空気圧を使用することで、伝達させる外套管の形状に依存せず動力

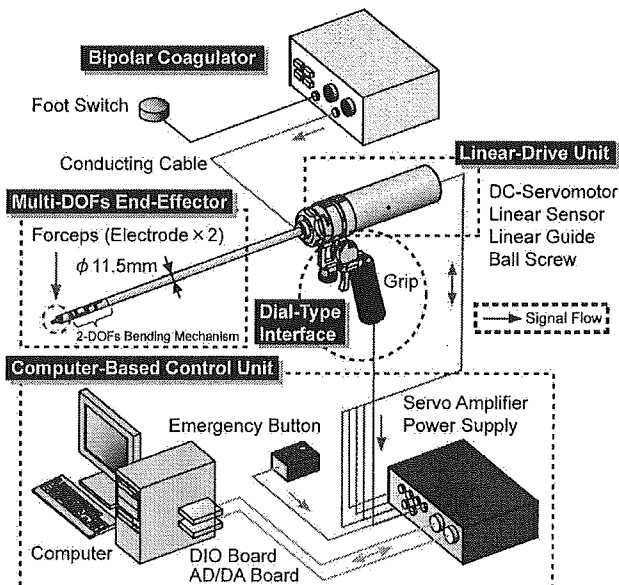


Fig. 1-2 System configuration of the bipolar electric scalpel manipulator.

を伝えることが可能である。ストッパーにはバネが組み込まれており、空気を抜くと、元の位置に戻る。

(2) 外套管モデル

Fig. 2-2 に今回試作した外套管モデルを示す。試作した外套管は外形 16mm であり、直径 7mm までの器具を通過させることができる。関節間の 30mm であり、それぞれの関節で±30° の屈曲が可能であり、最小曲率半径は 58mm となる。今回は三つの外套管小片をつなぎ合わせたモデルを作成した。このモデルは二つの関節を有することになる。このモデルでは一平面内での屈曲が可能である。

B.3 前立腺がん治療デバイス操作用マニピュレータの開発

B.3.1 前立腺がん熱凝固治療用集束超音波プローブ位置決め操作のための 5 節リンク式マニピュレータの基礎的開発

(1) マニピュレータ設計

超音波プローブ操作に必要なとなる自由度は、直腸内における姿勢決め 2 自由度、軸周り回転、並進の計 4 自由度である。

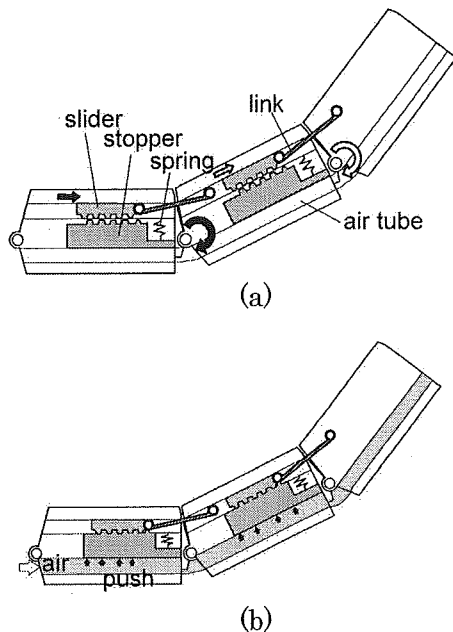


Fig. 2-1 Mechanism to switch rigid and flexible: a) flexible mode. b) rigid mode.

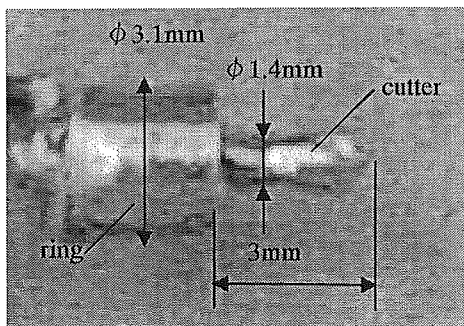


Fig.3-1 End effector of the manipulator

マニピュレータの設計に関して、設置・滅菌を考慮し、滅菌部と非滅菌部の分離が容易に可能な機構を特長とする設計を行った。すなわち、プローブ操作のためのモータを全てマニピュレータ下部に配置し、モータおよびボールねじなどを含む非滅菌部と、滅菌可能なリンク部の 2 つのパーツに分離が可能な機構とした。

(2) 5 節リンク式マニピュレータ

プローブの姿勢決めは、2 つのジンバル機構による支持により行い、その 2 次元位置決め機構に 5 節リンク機構を採用した。5 節リンク機構はモータをリンク下部に配置可能でかつ安全な駆動範囲が確保することのできる機構である。

プローブの軸周り回転に関しては 5 節リンクの関節部間をタイミングベルトで伝達し、リンクに内蔵可能な設計とした。支持ジンバルの回転によって、プローブの回転を行い、直腸方向への並進はボールねじによるリンク平面の並進と 5 節リンク機構の駆動を同時に行うことで実現する。以上の機構からなる作成したマニピュレータを Fig.3-1 に示す。

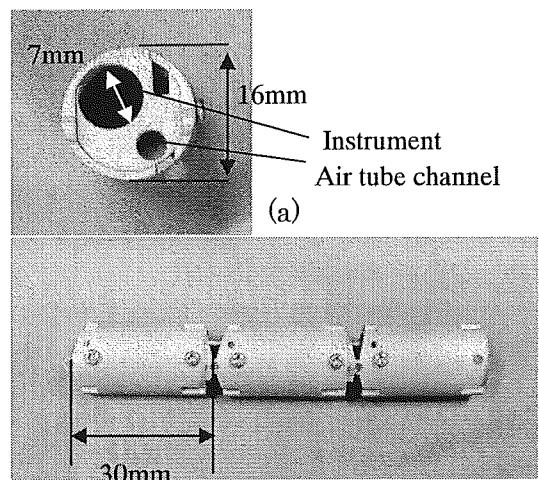


Fig. 2-2 Outer sheath model: a) cross section image. b) side view.

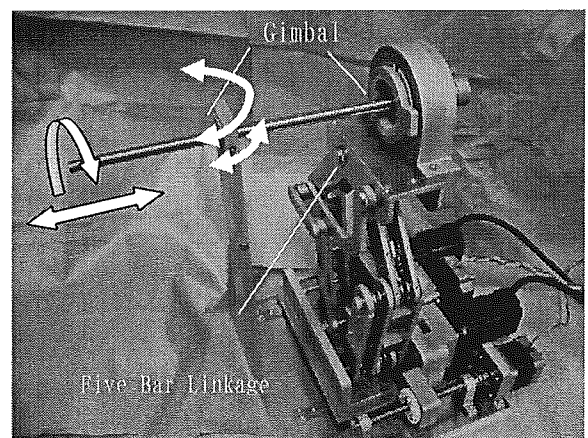


Fig.3-2 Probe Positioning Manipulator

B.3.2 前立腺がん凝固後切除マニピュレータの基礎的開発

製作したマニピュレータの凝固・切除機構を Fig.3-2 に示す。凝固・切除機構はカッターとリング部から構成されており、それぞれが電極となっている。カッターは外径 1.4mm, 突出し長さ 3mm であり、リングの外径は 3.1mm である。切除の手順は以下の通りである。まずカッターとリング部に高周波電流を流すことによってカッター周辺部を凝固し、その後カッターを回転させることによって凝固した範囲を切除する

B.4 手術用デバイス・マニピュレータの MRI 対応化

開発した MR 対応ロボットは 2 自由度の 5 節リンク機構により位置決めが可能である。MR 対応ロボットにおいて 5 節リンク機構を採用する利点は、MR Compatibility の向上が困難な駆動・伝達部を MR ガントリ中心付近に位置するアーム先端部から遠ざけることができる点にある。MR Compatibility 向上のため、アクチュエータとして超音波モータを採用した。

ナビゲーションシステムにおいては、光学式三次元位置計測器 Polaris を介して、MR 座標系とロボット座標系とのレジストレーションを行った。レジストレーションはビタミン E 小球を格子状に配置したファントムを用いた。

<倫理面への配慮>

本研究では動物実験を学外の専用施設で行った。動物実験は当該施設および東京大学の動物実験ガイドラインに従って行った。

なお、臨床試験は行っていない。

C. 研究結果・考察

C.1 多節スライダ・リンク機構を搭載した手術ロボットデバイス群の開発

C.1.2 *In vivo* 実験

動物（ブタ, 39kg, オス）を用い、本電気メスマニピュレータの生体における基本的な手術手技評価を行なった。主に血管の閉塞能力を検証するため、焼灼対象に大小の血管が存在する腸間膜を選択した。実験で使用したコアギュレータの設定は、周波数 450 kHz, バースト波使用, 繰返し周期 40 μ s, デューティサイクル 50% とし、最終的には電気メスの出力を 20 W まで上げながら数箇所血管閉塞を試みた。マニピュレータのアプローチ方向、電気メスの出力、鉗子部の把持力、焼灼時間を調整しながら行ない、血管周辺組織の焼灼を行なった後に凝固箇所を切断することで血管の閉塞状態を確認した (Fig. 1-3)。

屈曲自由度をうまく使うことにより、閉塞したい血管組織に対して垂直の方向から無理な力をかけずにアプローチすることが可能であった。1 箇所の閉塞につき 2~3 秒での焼灼を数回行ない、組織の変性

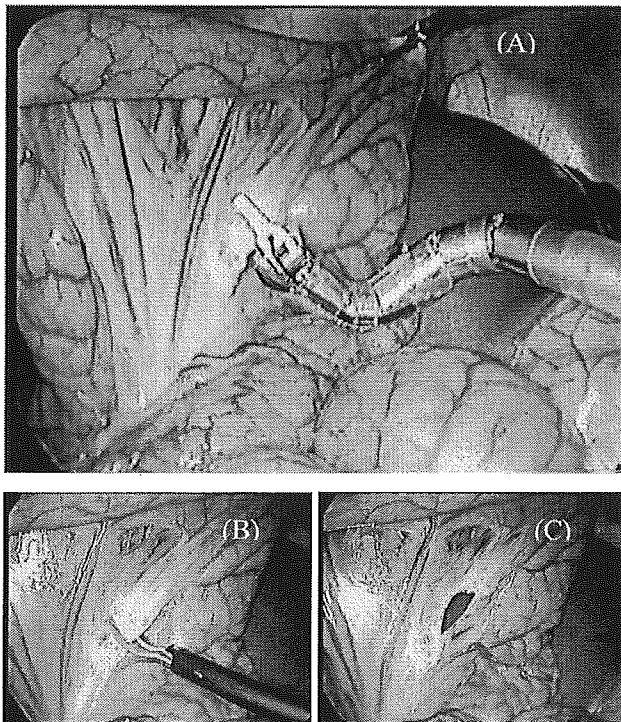


Fig. 1-3 Sealing mesenteric blood vessels. (A): Ablation of vessels with 2-DOFs bending motion of the bipolar electric scalpel manipulator. (B) and (C): Confirming vascular occlusion with cutting ablated tissue.

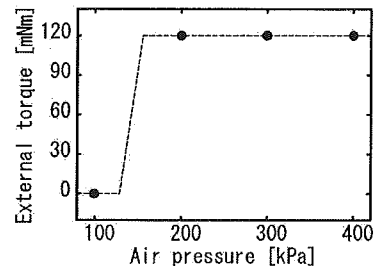


Fig. 2-3 Relation between torque and air pressure.

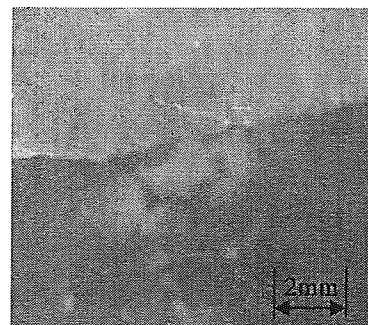


Fig.3-3 Coagulation of porcine soft tissue

を確認した後に凝固箇所を切断した。時間においても出血は認められず、完全に血管を閉塞できたことを確認した。

一方、今後改善すべき点としては、(1) 焼灼の繰り返しにより電極上に組織が膜状に付着し、通電効率が低下することがあったため、電極表面に凹凸をつけ、配列を改善する、(2) マニピュレータ本体術中での取り扱いを容易にするため、細径化や小型軽量化、先端の鉗子部に回転自由度の追加を検討する、等が挙げられる。

C.2 手術デバイス誘導用多関節外套管の開発

試作したモデルに対し、本機構の特徴である剛性に関する評価実験を行った。実験方法は一つの関節に対して外力を加え、関節が動くことなく形状を維持できる限界の外力と、空気圧との関係を測定した。Fig. 2-3 に測定結果のグラフを示す。今回の実験では最大の保持トルクが 120mNm となっているが、これは一関節間隔である 30mm 先で 400gf の力が垂直にかかった場合に相当する。さらに実際はそれ以上の外力にも耐えることが可能であることが予想される。また柔の状態と剛の状態とが切り替わる圧力は 130kPa であった。

C.3 前立腺がん治療デバイス操作用マニピュレータの開発

C.3.1 前立腺がん熱凝固治療用集束超音波プローブ位置決め操作のための 5 節リンク式マニピュレータの基礎的開発

5 節リンク機構の精度誤差は、可動範囲中心付近での駆動時で、プローブ保持部で約 0.5mm であった。これは先端部における誤差 1mm に相当する。

C.3.2 前立腺がん凝固後切除マニピュレータの基礎的開発

製作したマニピュレータを用いて凝固および切除実験を行った。実験には前立腺ファントムとしてブタ腿肉を用いた。凝固実験において高周波電流の電源出力は約 15W、通電時間は 2sec であった。また、切除実験においてカッターの回転数は 600rpm とした。

凝固実験の結果、高周波電流の通電によりリング部(外側電極)およびカッター(内側電極)の周辺に厚さ約 1mm の凝固層が生じた(Fig.3-2)。凝固をより適切な部位で生じさせるためには電極配置についてさらに検討する必要がある。また、切除実験の結果、カッター外径相当の範囲(直径約 1.5mm)を切削することができた。円滑な切削片排出のため流路の改善や灌流機構の設置を検討する必要がある。

C.4 手術用デバイス・マニピュレータの MRI 対応化レジストレーション後、ファントム上の格子点 10 点に対し穿刺を行い精度評価を行った結果、誤差は 2.11 mm (S.D=0.43 mm, N=5 mm)であった。

ロボット静止時と駆動時で SN 比を測定して比較したところ、SN の低下は最大 19.4%であった。

D. 結論

D.1 多節スライダ・リンク機構を搭載した手術ロボットデバイス群の開発

本研究ではバイポーラ電気メスマニピュレータの開発を行い、焼灼対象へと自由にアプローチを行ないつつ、血管を閉塞する能力を有することを確認した。今後はより臨床での使用に適したマニピュレータの開発を進めていく。

D.2 手術デバイス誘導用多関節外套管の開発

本研究では体内深部へ重要な臓器を迂回して侵入するための経路を確保する方法として、柔剛可変型可撓性外套管を提案し、そのための機構に関する試作を行った。そして、剛性に関する評価を行った結果、一関節分ではあるが 400gf 以上の外力に対して姿勢を保持できることを確認した。これは先端多自由度マニピュレータ 2) が 500gf の発生力を要求しようとし、それ以下でも十分な機能を持っていることから考えても十分な剛性を有するものと考えられる。

D.3 前立腺がん治療デバイス操作用マニピュレータの開発

D.3.1 前立腺がん熱凝固治療用集束超音波プローブ位置決め操作のための 5 節リンク式マニピュレータの基礎的開発

プローブ保持マニピュレータの 5 節リンク機構の精度誤差は十分小さいことが示されたが、最終的な評価として、プローブを先端に取り付け、ファントムを用いた焼灼実験を計画している。

D.3.2 前立腺がん凝固後切除マニピュレータの基礎的開発

実験により凝固・切除が可能であることが確認された。今後は灌流機構などと組み合わせ、システムの統合を目指す。

D.4 手術用デバイス・マニピュレータの MRI 対応化ナビゲーション下での穿刺については一定の精度が示された。ロボットの機構やレジストレーション方法の改善により、十分な精度が期待できる。

MR Compatibility については、ロボットの駆動による SN 比低下を一定以下に抑制できることが示されたが、画像の歪みも含めた検討が今後必要である。

E. 健康危険情報

特になし。

F. 研究発表

F.1 論文発表

特になし。

F.2 学会発表

- (1) 八木昭彦, 松宮潔, 正宗賢, 廖洪恩, 土肥健純:
スライダリンク機構及び空気圧を用いた可撓性
外套管のための 柔剛可変機構の基礎的検討,
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, pp129-130, 2005.
- (2) 山下紘正, 松宮潔, 正宗賢, 小林英津子, 佐久間
一郎, 廖洪恩, 橋爪誠, 土肥健純: 多自由度屈曲
型パイプーラ電気メス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, pp141-142, 2005.
- (3) 小原太, 松宮潔, 正宗賢, 橋爪誠, 土肥健純:
MR 対応型穿刺ロボットシステムにおけるナビ
ゲーションの基礎的評価, 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, pp213-214
2005.

G. 知的財産権の出願・登録状況

G.1 特許出願

特になし.

G.2 実用新案登録

特になし.

G.3 その他

特になし.

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）
分担研究報告書

「患者・医療情報統合システムの構築」

分担研究者 舘 暲 東京大学大学院情報理工学系研究科教授

研究要旨：

医療情報を患者に対し効果的に提示する手法として AR(Augmented Reality: 拡張現実感)技術を利用した「患者・医療情報統合システムの構築」を目指す。本年度はインフォームド・コンセントなどの際に患者に対して可視化する実世界指向型のディスプレイシステムのテストベッドを試作した。

A. 研究目的

本研究ではバーチャルリアリティやオーグメンティド・リアリティ(Augmented Reality: 拡張現実感)の技術を医療へ応用することで、より高度で直感的な視覚情報の提示環境を構築し、患者に対する医療情報画像提示技術の開発を目指す。本研究はオーグメンティド・リアリティやバーチャルリアリティの技術を利用した医用データの可視化をより高度かつ自然に行い、術部の情報（空間的・医療的）把握を精確かつ容易にならしめ、診断時やいわゆるインフォームド・コンセントにおける病状の説明・解説や医療の教育、医療情報の普及や啓蒙、医療過誤の防止など広い分野での応用を目指す。

医療情報を患者に提示するにあたって、体内の器官の部位など、特に3次元情報を直感的に提示するために、身体などの実世界情報にMRIなどで得られた情報を重畳表示し、より直感的でわかりやすい医療情報を提示することが本研究の最終目標である。この目標を実現するため、バーチャルリアリティの技術の中で、特に現実空間にバーチャルな情報を重畳表示する技術であ

る「オーグメンティド・リアリティ」を応用する。AR技術は、バーチャルな存在を提示することで現実世界での行動を補助することを目的としており、その特性上特に視覚に関する研究が多い。例えば手術の際に患者の皮膚をバーチャルに透明化する手法や、機械の利用に際して説明表示を実世界と重畳して提示する、などの応用が検討されている。本年度はインフォームド・コンセントなどの際に患者に対して可視化する実世界指向型のディスプレイシステムのテストベッドを試作した。また、実世界指向型の視覚情報提示システムにおいて、実世界とシームレスに知様可能なポインティングデバイスなどの要素技術の研究開発を行った。

B. 研究方法

B-1 医療情報提示のための実体型ディスプレイシステムの概略

医療の分野において、患者と医者との間で治療法についての意思疎通を図ることは非常に重要である。そのためには、言葉や文字による説明だけでなく視覚的な説明も重要である。現在用いられている視覚的な説明方法としては、二次元メディアを用い

たもの（紙、コンピュータのディスプレイ画面等）や、三次元メディアを用いたもの（模型等）がある。近年の医療の高度化、医療情報説明に対する患者側の意識の向上などに伴い、より複雑な内容を正確にわかりやすくそしてインタラクティブに提示することが求められている。印刷された図などでは事前に用意した図しか用いることができないため、インタラクティブな説明を行うことは困難である。また2次元メディアは本来3次元である情報を2次元に変換しているため例えば断面図から立体構造を推定するには慣れが必要である。これらの問題点を解決するために、2次元画面上にCGを描画するシステムも開発、使用されている。しかし、体内の臓器など複雑な形状を持った立体構造を提示するには限界がある。

また、立体模型を用いた説明の場合は立体構造の推定が容易で、さまざまな視点から観察することが容易である。しかし、模型を分割するなどの限定されたインタラクティブな説明が限界であり、例えばMRIによる計測結果を重畳させることなどは困難である。またより高度な提示のために時間変化を提示する、すなわちアニメーション機能を付与する場合には困難を伴う。

これらの問題点を克服するために、バーチャルリアリティの視覚技術を用いた方法が研究されている。バーチャルリアリティで用いられている技術には、HMD(Head Mounted Display)、IPT(Immersive Projection Technology)、RPT(Retro-reflective Projection Technology)などがある。インタラクティブ性などの前記の問題を解決するためには、模型等に映像を重畳させるこ

となどを実現させる複合現実感を用いるのが最適だと考えられるが、これに適した視覚技術としてはHMDを用いたものやRPTを用いたものが挙げられる。

HMDを用いた際の問題点として、HMDは眼を覆ってしまうという点がある。特に、患者と医者との間で治療法についての意思疎通を図る際には、医者側が患者を観察し、理解の程度を把握しながら説明を臨機応変に変更したり、患者側も医者の態度などから安心感を得たりなどの非常に高度な対面コミュニケーションが行われている。HMDが目隠しであるということは、この対面コミュニケーションにおいて最も重要な相手の眼を見たり視線を感じたりというノンバーバルコミュニケーションの主要部分を著しく阻害してしまう。

また、旧来説明に用いられてきた紙（図）と模型の大きな違いとして「実体性」がある。人間は複雑な3次元情報を知覚するには2次元の「図」よりも実体としての構造をもつ「物体」がはるかに効率的である。

これらの点から本研究では、RPTを用いた「医療情報提示のための実体型ディスプレイシステム」を試験的に実装した。

さらに本システムで患者と医者との間で治療法についての意思疎通を図るために重要となる実世界とVR世界とのシームレスなポインティングデバイスとして一軸力覚提示可能なポインティングデバイスを開発し、その有用性を評価した。

B-2 再帰性投影技術（RPT）の概略

本研究はそのキーとなる技術としてRPTを用いている。ARを実現する視覚ディスプレイとしてさまざまな手法が提案されてい

るが、その中に単純かつ確実性の高い手法として RPT (Retro-reflective Projection Technology:再帰性投影技術)がある。これは再帰性反射材とよばれる素材をスクリーンとして用いて物体を提示しようという技術である。本節では、RPT の概要を説明する。(なお、B-2 節は平成16年報告書と同内容であるが、本報告書の理解のため再掲する。)

B-2-1 再帰性反射材の概略

再帰性反射材とは入射してきた光を、入射方向とほぼ同一の方向へ反射する素材である。(図1)



図1 再帰性反射

表面を微細なガラスビーズで覆い、ガラスビーズと外気の相対屈折率をほぼ 2:1 に保つことでこのような反射性能を実現している。(図2)

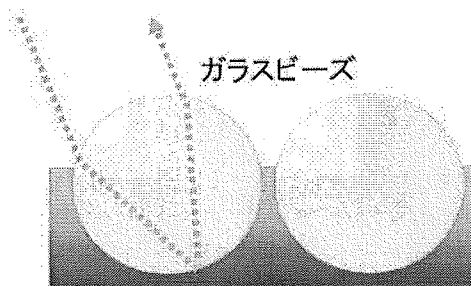


図2 ビーズ式再帰性反射材

ビーズを使うものの他に微小なプリズムを用いる物もあり、反射輝度は高いが広角の反射において再帰性反射の能力がビーズのものに比較すると低い。また、ビーズの

ものは反射に際して偏光を保存するが、プリズムのものは内部で何回か反射が行われるために偏光を壊してしまう性質がある。再帰性反射材は本来工事や、交通関連の安全用品として販売、開発されていた物である。ビーズで覆う素材としても様々なものが研究されており、一番輝度が高いものは、アルミを蒸着したものである。しかし、それより反射性能は落ちるが様々な色の再帰性反射材が開発されており手軽に用途に応じて利用することができる。例えば、スクリーンに投影するという特性上にも投影していないスクリーンの反射輝度が RPT で表現できる最低の輝度であり、そのため輝度のダイナミックレンジ確保のためには特に黒色の再帰性反射材は有効である。なお、再帰性反射材は水など表面のビーズの構造を壊してしまうような物質が付着すると著しく反射性能が落ちてしまう。これを解決した製品としてはクローズドタイプやカプセルレンズタイプといった表面に保護膜をつけたものもある。これに対し従来のビーズが剥き出しの反射材をオープンタイプと呼ぶ。オープンタイプに比較すると、クローズドタイプやカプセルレンズタイプの反射輝度は落ちる。

B-2-2 RPT の原理

特性上、再帰性反射材は反射に関して非常に高い指向性を持つ素材となっている。RPT はこの特性を利用し、再帰性反射材を塗布あるいは貼り付けることにより任意形状の物体をスクリーンとして用い、プロジェクタにより提示物体を投影するというものである。再帰性反射材は光源と同方向に大部分の光が返ってくるので、ユーザはハ

ーフミラーによって作られたプロジェクタと光学的共役点にある地点から映像を観測することになる。非常に高輝度な映像が得られる為、たとえ日中であってもスクリーン上への投影・提示が可能である。(図3)

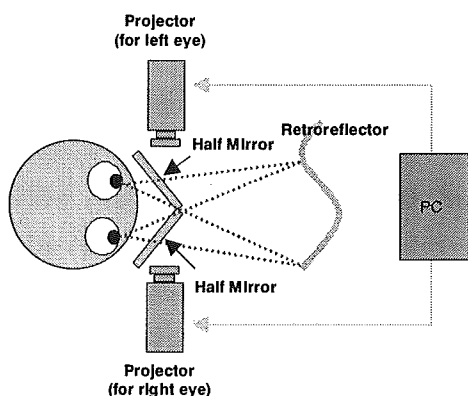


図3 RPTの構成図

このシステムの特長としては以下のような点が挙げられる。

- (1) 再帰性反射の特性上高輝度・高指向性であり、小型プロジェクタで日中でも映像を提示可能
 - (2) スクリーン形状に起因する像の歪みが生じない
 - (3) 大きな焦点深度を持ち、任意形状、任意位置のスクリーンに対し、広い範囲で結像可能
 - (4) 再帰性反射材を塗布可能な任意の物体をスクリーンとして利用可能
 - (5) 水晶体調節・相互遮蔽問題を解決可能
- これらの特長に加え、さらに、それぞれの要素を融合することで、スクリーン輝度の距離依存性の減少(1)+(2)、手などの物体とスクリーン面との大きな輝度差による適切な遮蔽関係(1)+(3)、両眼像の空間的分離

による裸眼立体視(1)+(2)+(3)といったような単独では生まれ得ない効果も各要素を同時に満たすことにより、発生する。

B-3 医療情報提示のための実体型ディスプレイシステム

本研究の「患者・医療情報統合システム」は患者への医療情報の提示において、ARの技術を用いて、トルソや人体などの実体に各種医療データを重ね合わせて提示することを目指す。また、医療訓練やインフォームド・コンセントにおける有効性を高めるため、提示された情報の「部位」を指し示すポインティングデバイスの開発を目指す。

ポインティングデバイスの技術課題としては、3次元空間(実空間)と実体方ディスプレイ(VR空間)での矛盾なきポインティング技術を実装する必要がある。

B-3-1 システム構成の概要

システム全体は、図4のようにRPTシステムと一軸力覚提示可能なポインティングデバイスのシステム(指し棒システム)から構成される。これらのシステムは、EIA232C規格による相互通信が可能となっており、お互いに情報及び命令をやり取りすることができる。以下では、これらのシステムの詳細について説明する。

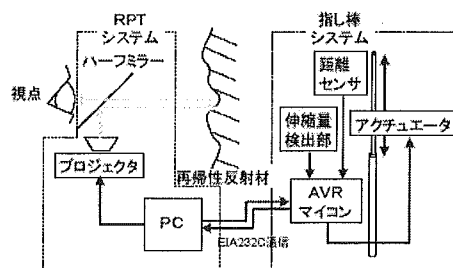


図4 システム概略

B-3-2 RPT システム構成

RPT システムは、再帰性反射材へと映像を投影するためのシステムであり、その概略は図5の通りである。

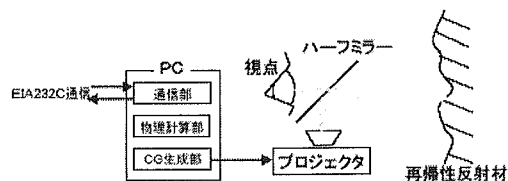


図5 RPT システムの概略

PCにより生成されたCGは、図6に示すように2台のプロジェクタ(PLUS V-1080)から出力される。それぞれのプロジェクタは右目及び左目と光学的に共役な位置に配置されており、それぞれに対し右目の視点からのCGと左目の視点からのCGを送ることにより視差による立体視を可能にしている。

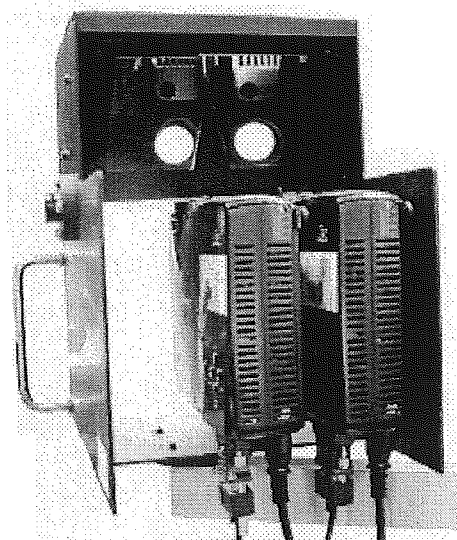


図6 立体視可能なRPTシステム

プロジェクタからの映像は、ハーフミラーによって再帰性反射材表面へと送られ、

反射材表面にて再帰性反射しハーフミラーの位置へと戻る。このとき、プロジェクタが視点位置と共役な位置にあるため反射光の半分は視点位置へと戻る。通常のスクリーンでは、返ってくる光は乱反射した光の一部であるため、投影に用いる光源は強力でなくてはならない。しかし、再帰性反射材では返ってくる光は反射光であるので投影した光の大部分が返ってくる。そのため、室内や屋外でも現在市販されているプロジェクタで十分強い反射光が返ってくる。

本研究では人間の胸部を想定した実体型ディスプレイとして図7のようにトルソ表面に再帰性反射材を貼付したものをを用いた。トルソとしては、発泡スチロール製のものをを用いた。これは人体胸部とほぼ同じ大きさとなっている。

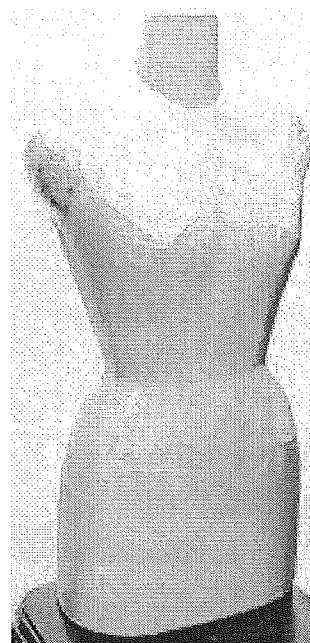


図7 再帰性反射材で覆ったトルソ型ディスプレイ部

また、描画や差し棒システム制御のため

の PC の緒元を表 1 に示す。

表 1 RPT システム PC 緒元

| | |
|-----------|--------------------------|
| CPU | Intel PentiumIII |
| 動作周波数 | 1GHz |
| メインメモリ | 512MB |
| OS | Microsoft Windows XP SP2 |
| グラフィックボード | Radeon9800 |

描画プログラムは、Microsoft Visual C++ .NET 2003 を用いた。また、グラフィック描画ライブラリとしては DirectX 9.0c を用いた。描画の際の解像度としては、片目あたり 1024x768、両方あわせて 2048x768 の領域に描画を行った。システムに用いるモデルとしては、Curious Labs 社 Poser5 に付属の骨格モデルを用いた。このモデルのポリゴン数は、16042 ポリゴンである。

B-3-3 差し棒システム構成

実体型ディスプレイシステムを用いて、患者への医療情報を提示する際、ある特定の部位をポインティングすることを考える。従来の 2 次元ディスプレイ上である特定部位をポインティングするデバイスとして有効で基も普及している手法は「マウス」を用いるものである。しかし、本システムなどの 3 次元情報を扱うディスプレイシステムで 3 次元の位置をポインティングする場合には「マウス」は直感的でない。今回想定する対面コミュニケーションを伴う場合、特に医者側には操作の習熟は期待できるが患者側に操作への習熟を要求しないことを前提とした場合、極めて直感的なポインティングデバイスが要求される。また、実体型のディスプレイを利用する際には実世界

とディスプレイ内の VR 空間でのポインティングがシームレスに行える機構が要求される。本システムでは実空間において極めて直感的なポインティングデバイスである差し棒を用い、実空間とディスプレイ内の VR 空間でシームレスに利用可能とする手法を実装した。

また、多くの 3 次元用ポインティングデバイスにおいて、触覚や力覚によるフィードバックが採用されている。これは、現実世界でのフィードバックが触覚や力覚によるからである。特に、バーチャル物体をポインティングデバイスが突き抜けてしまう現象を防ぐことができる力覚フィードバックは、有力であるために採用されることが多い。本システムでもこの目的で力覚提示機能を併せ持つ実装とした。

具体的には、実体型ディスプレイ内部に提示したバーチャル物体を指そうとした場合、ポインティングデバイスは現実の物体内部に入り込まなければならない。しかし、ポインティングデバイスそのものを現実の物体内部に入り込ませるわけにはいかないため、図 8（上）のようにバーチャルなポインタを描画してポインティングを行う。

デバイスは伸縮可能で、実空間上で使用されているときは完全に伸長した状態であり、通常の指し棒と同様に用いることができる。実体型ディスプレイ内部に提示されているバーチャル物体をポインティングしようとしたとき、図 8（下）に示すようにデバイスは収縮を開始し、ディスプレイとデバイス先端とが接触しないように長さを制御する。また同時に、デバイス先端があるべきであった位置にバーチャルなポインタを現実の物体内部に表示させる。この機

構により、現実空間とバーチャル空間との間のシームレスな移行を実装する。さらに本デバイスを動かし、バーチャル物体とバーチャルなポインタが接触するとき、デバイスは収縮を停止しディスプレイ面とデバイス先端とを接触させ、力覚の提示を行う。

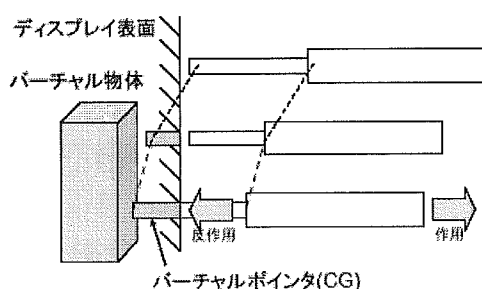
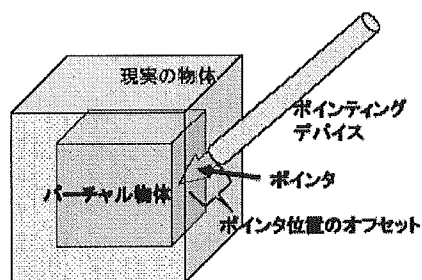


図8 差し棒システムの基本コンセプト

図9に試作した一軸力覚提示可能なポインティングデバイスの外観を、表2に緒元を示す。



図9 試作したポインティングデバイス

表2 ポインティングデバイスの緒元

| 部位名 | 長さ (mm) | 幅 (mm) | 奥行き (mm) |
|--------------|----------|--------|----------|
| 伸縮部 | 120-460 | 10 | 10 |
| 繋部 | 460 | 17 | 17 |
| 握り部 | 190 | 35 | 35 |
| 全体 | 760-1100 | 35 | 35 |
| 重量 (回路、電源除く) | 280(g) | | |

長細に対する断面の形状は、伸縮部は円形、繋部と握り部は正方形である。また、長さの測定方向はデバイスの長軸方向である。

本ポインティングデバイスには、以下の機能がある。(1)非力覚提示時にディスプレイ表面と接近した際、不要な力を返さないようにするために収縮し衝突を回避する機能(2)力覚提示時にディスプレイ表面に接触し、使用者に対し力を提示する機能。これらを実現するために、図10に示すようにディスプレイ面との距離を測る距離センサや伸縮量を計測するエンコーダ、伸縮させるためのアクチュエータが内蔵されている。アクチュエータは棒に搭載されているマイコンによって制御されており、また電源も内蔵されている。(各部は図11~14)

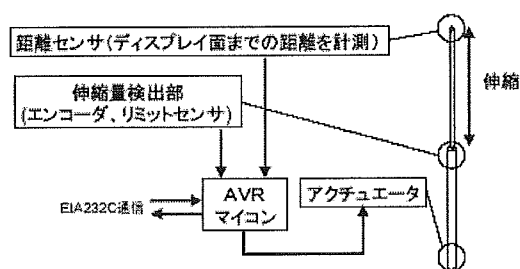


図10 差し棒部の構成

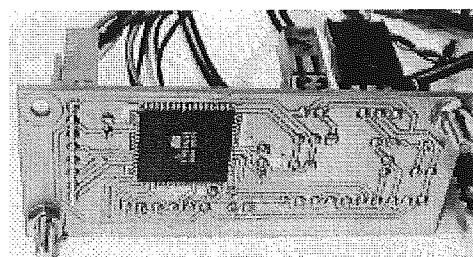


図11 AVRマイコンと制御部

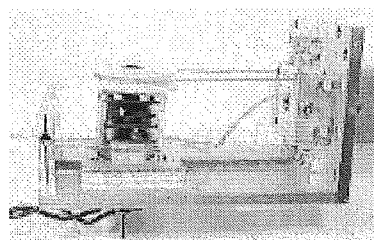


図12 アクチュエータ部