

作した。In vivo 実験を行い、医師の協力のもと、蛍光計測および操作性の評価を行った。空間分解能が高いため精度が良い反面、僅かな位置合わせのずれで蛍光を検出することができなくなった。そのため、術者へのガイド機能を付ける、計測の分解能を下げることで位置合わせを容易にする等の改良が必要であることが分かった。また今後は、レーザモジュールを省くことによる小型軽量化や、グリップなどのユーザビリティの向上も図っていく。

また、我々はこれまで行ってきた局所蛍光計測システム技術を応用し、局所計測システム、サブミレベルの組織蒸散を行うマイクロレーザ、脳表に対して精密な位置決めを可能とする AF システムとを統合した、計測-治療システムを製作中である。今後は最終年度に向けて、このシステムの完成・評価を進める。

MRI 撮像シーケンスにおけるプロトン緩和待ち時間内に限定してモータの駆動を行うことで、ノイズの発生を伴うモータ駆動と撮像とを同時に実現した。MRI 装置とモータの同期制御には励起 RF パルスを同期トリガとして使用することで広い応用が可能な汎用的な手法とした。本研究ではモータ単体による画像劣化の程度を評価するにとどまったため、今後は手術支援マニピュレータとの統合を行い、本手法を用いながら画像誘導下に術具位置決め精度の評価を行う。

拡張アクティブトラッキングコイルにおいて、以下のことが示された。1)フリップ角を3度程度と小さくすることで水中におけるピーク値の S/N 比を3.90 とでき体内における計測可能性が示された、2)コイル間の距離の揺らぎは MRI の計測分解能を0.78 mm において標準偏差で0.7mm 程度であり、受信コイルの位置姿勢によらず同一形状の三角形として計測することが可能である、3) 同一位置に固定した状態における位置・姿勢計測再現性評価を行った。揺らぎは分散で0.4mm, 0.7deg 以下であり MRI の計測分解能0.78 mm 程度で安定に計測可能であった。以上より、位置・姿勢計測装置として提案手法を利用可能であることが示唆された。

## F. 健康危険情報

なし

## G. 研究発表

### 1. 論文発表

- 1) C. Chui, E. Kobayashi, X. Chen, T. Hisada, I. Sakuma, Transversely isotropic properties of porcine liver tissue, Med Bio Eng Comput 45:pp99-106, 2007
- 2) 鈴木孝司, 廖洪恩, 小林英津子, 佐久間一郎, 画像誘導下手術支援ロボットシステムのための MR

I 対応モータ駆動法, 生体医工学, 2006

### 2. 学会発表

- 1) T. Suzuki, Y. Katayama, E. Kobayashi, I. Sakuma: Evaluation of compact forceps manipulator using friction wheel mechanism and gimbals mechanism for laparoscopic surgery, Computer Assisted Radiology and Surgery (proc. CARS2006), Osaka, pp.220-222(Orl), 2006
- 2) S. Onogi, H. Liao, E. Kobayashi, Y. Jimbo, I. Sakuma, S. Watanabe, H. Noshimura: Simultaneous measurement of position and orientation for interventional MRI devices, Computer Assisted Radiology and Surgery (proc. CARS2006), Osaka, pp.496(Poster), 2006
- 3) E. Aoki, T. Suzuki, E. Kobayashi, K. Konishi, M. Hashizume, I. Sakuma: Design of Modular Master-Slave Surgical Robotic System for Integrating Independently developed Forceps Manipulator, Computer Assisted Radiology and Surgery (proc. CARS2006), Osaka, pp.506(Poster), 2006
- 4) E. Aoki, T. Suzuki, E. Kobayashi, K. Konishi, M. Hashizume, I. Sakuma: Modular Design of Master-Slave Surgical Robotic System with Reliable Real-Time Control Performance, The first IEEE / RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob2006), Pisa (Italy), F119 (CD 抄録集 Poster), 2006
- 5) Masafumi Noguchi, Eisuke Aoki, Daiki Yoshida, Etsuko Kobayashi, Shigeru Omori, Yoshihiko Muragaki, Hiroshi Iseki, Katsushige Nakamura, Ichiro Sakuma: A Novel Robotic Laser Ablation System for Precision Neurosurgery with Intraoperative 5-ALA-Induced PpIX Fluorescence Detection, MICCAI 2006, Part I, Lecture Note in Computer Science 4190, pp.543-550, 2006
- 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2報 オクルージョン問題の回避, 第15回日本コンピュータ外科学会大会 第16回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集, pp.223-224, 東京, 2006
- 7) 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: 5-ALA 誘導 PpIX 蛍光計測による手持ち型局所的脳腫瘍同定システム, 第15回日本コンピュータ外科学会大会 第16回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集, pp.219-220, 東京, 2006
- 8) 小野木真哉, 廖洪恩, 小林英津子, 佐久間一郎, 谷口拓樹, 渡部滋: MRI 位置姿勢計測法-拡張

アクティブトラッキングの基礎的評価, 第 15 回  
日本コンピュータ外科学会大会 第 16 回コンピ  
ュータ支援画像診断学会大会合同論文集,  
pp.183-184, 東京, 2006

- 9) 鈴木孝司, 廖洪恩, 小林英津子, 佐久間一郎: MRI  
誘導下手術支援マニピュレータにおける同期制  
御を用いた MRI 対応性の基礎検討, 第 15 回日本  
コンピュータ外科学会大会 第 16 回コンピ  
ュータ支援画像診断学会大会合同論文集, pp. 35-36,  
東京, 2006
- 10) 芦田秀一, 蓮尾健, 青木英祐, 鈴木孝司, 小林  
英津子, 神保泰彦, 佐久間一郎: 超弾性合金を用  
いた他自由度屈曲鉗子マニピュレータ機構の改  
良, 第 22 回ライフサポート学会大会 (第 4 回生  
活支援工学系学会連合大会講演予稿集): p72,  
2006
- 11) デディ・ヌル・ザマン, 芦田秀一, 鈴木孝司,  
小林英津子, 神保泰彦, 佐久間一郎: MR 磁場を  
利用する新型アクチュエータの開発, 第 22 回ラ  
イフサポート学会大会 (第 4 回生活支援工学系学  
会連合大会講演予稿集): p76, 2006
- 12) 鈴木孝司, 廖洪恩, 小林英津子, 佐久間一郎: MRI  
パルスシーケンスとの調和性を考慮した MRI 対  
応性に関する基礎検討. 生体医工学シンポジウム  
2006 講演予稿集, pp:154-155, 2006
- 13) 吉田大樹, 平川洋輔, 青木英祐, 野口雅史, 荒  
船龍彦, 廖洪恩, 小林英津子, 神保泰彦, 丸山隆  
志, 村垣善浩, 伊関洋, 佐久間一郎: 5-ALA 誘導  
PpIX スペクトル計測による脳腫瘍術中同定の研  
究, 第 45 回日本生体医工学会大会論文集: pp681,  
2006
- 14) 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, 日本機械学会ロボティク  
ス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH' 06, 1A1-A01,  
東京, 5 月, 2006 (ポスター発表)

D. 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する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・試作を引き続き行った。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、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配置シミュレーションが術具位置認識率向上に貢献することが明らかとなった。2)MRI等の3次元診断画像情報をベースにした3次元Volumeデータをレーザロボット装置に読み込み、顕微内視鏡画面に重畳することで、治療領域決定に画像診断情報を直接利用できるようにした。またオートフォーカスZ軸部からの位置情報外部出力部を実装して、3次元表面形状計測の可能性を明らかにした。

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、それに伴い行ってきた術中情報可視化・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

での検討はされていない。

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、3DCADデータによる脳外科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Polarisの最適配置法の提案と、最適配置シミュレーションを用いた実手術室でのPolaris最適配置がナビゲーションシステムに与える効果について検討した。

前年度までに、3D-CADを用いて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)を仮想空間上にモデリングし、自由な利き・スタッフの配置と、Polarisの計測範囲を視覚的な表現を可能にした(図1)。

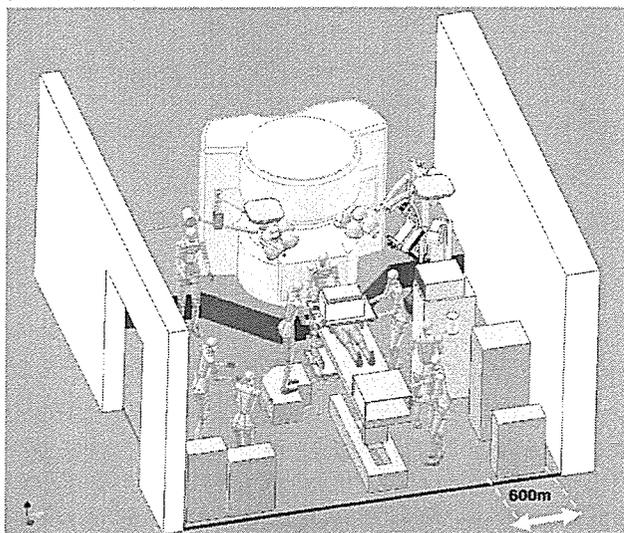


Fig.1 OpenMRI手術室内機器・人員の3Dデジタルデータ化

この仮想手術室上において、Polarisの最適な配置法として、術具マーカの認識率を最高にする配置法を定義した。本来の手術においては、マーカ認識の指向性や術者・手術用機材による遮蔽等の影響を考慮する必要があるが、今回はシミュレーションの簡略化のためPolarisの計測範囲が術具のマーカ部駆動範囲をすべてカバーしている場合を規定し、遮蔽に関しては手術用顕微鏡のみを考慮した。(図2)

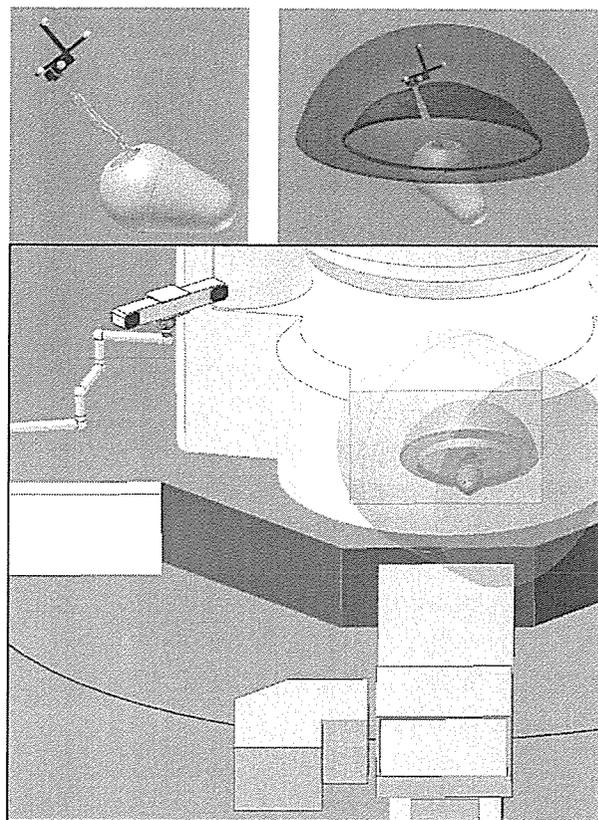


Fig.2 計測範囲ベースのPolaris最適配置法。左上：患者頭部モデルとマーカつき術具モデル、右上：術具マーカの駆動軌跡のモデル化、下：最適配置状態。Polarisの計測範囲(黄色モデル)内に術具マーカ駆動軌跡(緑モデル)が収まっている。

この仮想手術室上でのPolaris最適配置(術具認識率を最高にする配置)シミュレーション結果を、現実の手術室環境へ反映させるための方法として、以下の方法をとった。

1. Polarisを搭載したナビゲーションシステム本体の手術室座標系での位置と、Polaris固定アームの各関節角度を測定・設定可能とすることで、手術室座標系とPolaris座標系を統合する。
2. 手術開始後(ナビゲーション起動前)にPolarisを用いて顕微鏡位置・患者開頭部位位置を測定し、1.を元に手術室座標系での顕微鏡・患者開頭部位を決定する。
3. シミュレータにナビゲーションシステム位置、Polaris固定アーム各関節角度、顕微鏡位置、患者開頭部位を入力し、Polaris最適配置シミュレーションにより最適なPolaris位置を実現するアーム各関節角度を求める。
4. 実際のナビゲーションシステムのアーム角度をシミュレーション結果により調整する。

以上のシミュレーションにより術具認識率がどの程度向上するかについて、ファントムを用いて認識率調査を行った。

## 2) 手術マニピュレータの多機能・高機能化 -オートフォーカス機能を利用した対象の3次元形状計測と、Volumeデータを利用した指令入力機能の実装 -

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。

昨年度は5-Aminolevulinic acid (5-ALA) 経口投与による術中腫瘍領域同定法を用いて、腫瘍細胞が発する蛍光を検出して、術者の指定したレーザ照射領域の内部で腫瘍細胞が存在する領域のみにレーザ照射する機能を開発した。

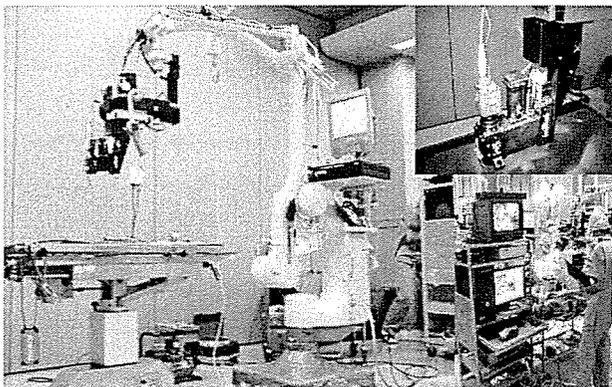


Fig. 3 OpenMRI対応レーザ手術ロボットシステム  
左: 全体図。MRI対応顕微鏡架台にレーザユニット・画像ユニットを備える。右上: 昨年度製作したレーザ・AFユニット。右下: レーザ手術ロボットコントロール装置。

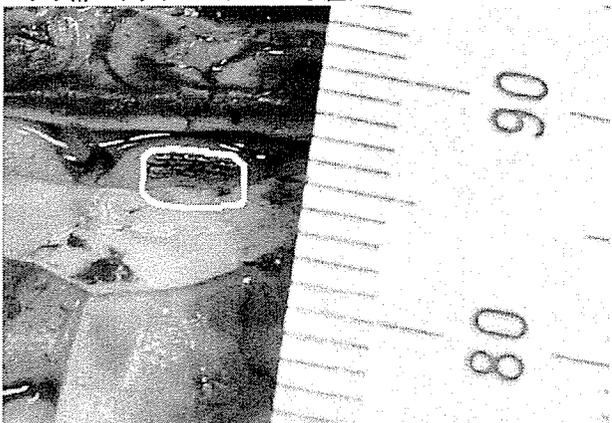


Fig. 4 腫瘍局在自動診断下でのレーザ照射結果。黄色線は操作者による蒸散部位指令領域。硬膜(蛍光を発しない)にレーザを照射していないことが確認できる。

今年度本研究では、レーザ手術システムの操作コンソールの新機能として、照射対象の形状計測・提示機能と診断情報のVolumeデータの提示機能を開発した。

本レーザ手術ロボットシステムは、システムに組み込まれた顕微鏡のビデオ画像をベースに、画像上にレーザ照射領域をマウスで描画する方法で、駆動指令を入力する。すなわち、治療領域決定に用いられる情報環境は通常の手術における医師の治療領域判断と変わらない。ロボット装置としてのベネフィットを獲得するためには、医師のDecision Makeの助けとなる情報や自動診断機能の搭載が望まれる。

脳腫瘍外科手術時の腫瘍領域同定に主に用いられるのは、術前・術中のMRI/CT/PETなどの2/3次元医用画像である。我々は術中MRI画像とナビゲーションシステムを利用して脳腫瘍摘出率の向上を図っており、本手術ロボット手術においてもMRIナビゲーションシステムとの連動が可能であるが、ロボットとナビゲーションシステムは独立したシステムであるため、操作指令のための領域描画時にナビゲーションシステムの情報を利用することは難しい。そこで本研究では、レーザ手術ロボット装置にMRI等の3次元診断画像情報をベースにした3次元Volumeデータをレーザロボット装置に読み込み、顕微内視鏡画面に重畳することで、治療領域決定に画像診断情報を直接利用できるようにした。

また、本ロボットシステムはオートフォーカス機能により、レーザヘッドと照射対象(脳表)との距離が一定になるように駆動制御されている。すなわち、ヘッドの駆動軌跡は照射対象サーフェスの3次元形状に一致する。これを利用して、レーザヘッドのXY駆動指令値とオートフォーカス軸(Z軸)位置情報を記録することで、対象の表面形状計測を行うことが出来る。今年度はオートフォーカスZ軸部からの位置情報外部出力部を実装して、3次元表面形状の計測可能性を調査した。

### (倫理面への配慮)

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 -

Polarisの最適配置シミュレーションを行う前に、現状の臨床でのPolaris認識率の調査を行った。

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)での脳腫瘍手術3例において、

1) ナビゲーションシステムが性状稼動状態にあり、かつ

2) 術者がマーカつき術具を用いて処置を行っている

という条件を満たしている期間のPolaris認識率を測定した。ここでPolaris認識率とは

$$\frac{\text{(術具座標を正確に出力できた回数)}}{\text{(Polarisが測定を行った回数)}}$$

である。

結果を表に示す。どの症例でも認識率は低く、またかなりのばらつきがある。人気率の低下には、

① Polarisの計測範囲が術具の駆動範囲の全てを満たしていないこと

② 顕微鏡や執刀医における計測に関する障害

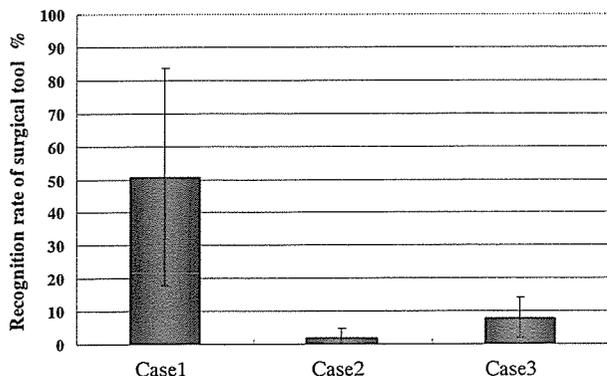
③ 術者の体、及び手によるPolarisの計測視野の遮蔽

④ 術具の姿勢の影響(反射球がPolarisで計測できない状態である)

⑤ 術具の反射球の劣化や手術室内における外乱の影響

など、様々なものが考えられるが、Polarisが最適に配置されていないことが一因を担っている可能性がある。

Table.1 脳腫瘍手術におけるPolaris認識率



次にインテリジェント手術室にて、患者頭部を模したファントムを用いて、シミュレーションによるPolarisの最適配置効果について検証した。

頭部ファントムを手術ベッド上に配置し、光学式マーカを取り付けたバイポラでファントム上の5点を各1分間指し示した。この作業を3回行い、その間のPolaris認識率を求めた。この計測を、Polarisの位置姿勢を目視で設定した場合(n=4)とシミュレーション結果を元に設定した場合(n=4)の両方で行った。顕微鏡についてはファントム上の開頭部を捕らえるように配置したが、それ以外の器械台やドレープ、スタッフ等の機材・人員は配置しなかった。

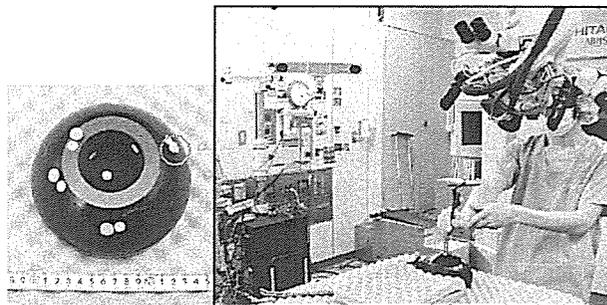
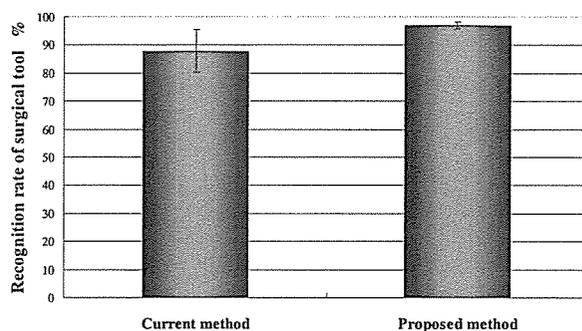


Fig.5 術具認識率計測実験。左は頭部ファントム。

結果を表に示す。目視で設定した場合の認識率87.9%(SD 7.5)に対しシミュレーション利用時は97.0%(SD 1.3)と、平均認識率およびばらつきが向上した。

Table.2 シミュレーション結果非適用例と適用例でのPolaris認識率。左:非適用(目視で設置)、右:適用例。n=4



### 2) 手術マニピュレータの多機能・高機能化

#### - オートフォーカス機能を利用した対象の3次元形状計測と、Volumeデータを利用した指令入力機能の実装 -

図に本年度開発した新モジュールを示す。

MRI等の3D診断データを2値化することで作成した3次元マップを読み込み、ラベルの境界を重畳した。図では、φ20mm球のラベルVolumeデータから作成した円状ラベルデータを指令入力画面(顕微内視鏡画面)に重畳している。

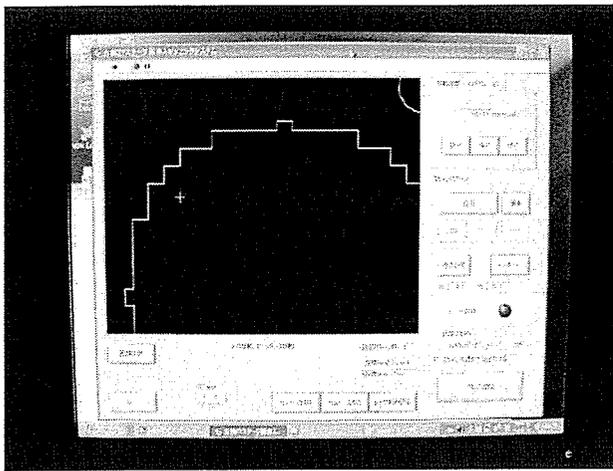


Fig.6 Volumeデータを読み込・表示させた操作インターフェイス。緑線が読み込んだVolumeデータ(φ20mmの球)の輪郭を現す。

Z軸位置情報とXY駆動情報をリンクさせた照射対象の3次元表面計測機能について、φ3mmのゴムチューブを用いて機能確認を行った。

測定対象と測定結果を図に示す。現在キャリブレーションが不正確なため、Z軸座標の絶対値は不正確であるが、形状を正確にトレース可能であることが確認できた。

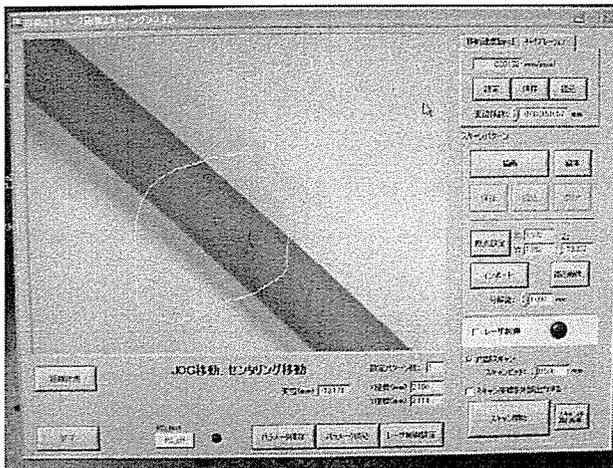


Fig.7 操作画面。顕微内視鏡でφ3mmのゴムチューブを捕らえ、マウスにて測定領域(緑線)を指定。

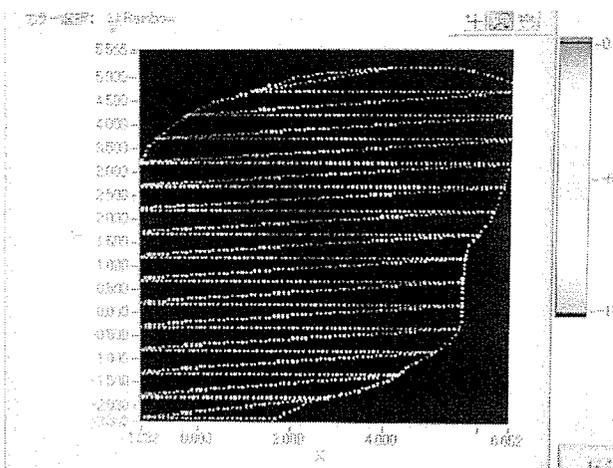


Fig.8 測定結果。ゴムチューブに沿って高低のある立体的なサーフェスが構成されていることが確認できる。

## 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。

今年度の研究では、最適配置による機能向上が顕著に現れる光学式位置計測装置を対象に、本仮説を実証する試みを行った。今回はファントムを用いたが、実際の臨床では今回用いた「Polaris計測範囲がマーカ駆動領域をカバーする位置」という配置方法のみではカバーできない問題が生じる。特にマーカの指向性と術者・機材による遮蔽の影響は大きいことが考えられるので、シミュレーション条件をさらに検討する必要がある。

今後の研究課題として、本研究事業では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、自動診断かで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。

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来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てきた。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、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た。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。そこで昨年度研究では5ALA診断情報のロボットシステムへの組み込みによる自動診断機能、そして今年度研究ではVolumeデータの読込とその指令画面上への重畳機能を開発し、指令画面上で診断情報を確認、もしくはロボットが診断情報を自動認識し蒸散の可否を自動判別することが出来た。手術ナビゲーションすなわち診断情報に基づく治療法の意味決定補助装置の高度化により、手術ロボット導入による高品位な治療の実現が可能になると考えられる。

また本年度実装した照射対象表面形状計測機能は、レーザ照射前後の計測結果を比較することにより、組織蒸散量すなわち治療結果を定量的に評価することができる。レーザによる蒸散量は対象組織の違いや表面状態(血液・生食水など液体の存在)により変化する可能性があり、また液体の存在により肉眼では確認し図来ことがある。本機能により、レーザ手術の進捗・結果を定量的に把握することが出来、精密な組織蒸散コントロールに大きく寄与するものと考えられる。

#### E. 結論

本年度は以下の2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手術室の手術ナビゲーションシステムのセンサであるPolarisの最適配置シミュレーションを行い、その結果を用いてのPolaris配置決定を行った。Phantom実験の結果、シミュレーション結果がセンサ認識率の向上に寄与する可能性が示唆された。
- 2) OpenMRI対応レーザ手術ロボットシステムの新機能として、MRI等の3次元診断画像情報をベースにした3次元Volumeデータをレーザロボット装置に読み込み、顕微内視鏡画面に重畳することで、治療領域決定に画像診断情報を直接利用できるようにした。またオートフォーカス気候を利用しての3次元表面形状計測を実装し、組織蒸散量の定量計測の可能性を明らかにした。

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

伊関洋、村垣善浩、中村亮一、大森繁、西澤幸司、ロボット外科(精密手術)、適応医学10(2):40-45、2006

Koji Nishizawa, Masakatsu G Fujie, Kazuhiro Hongo, Takeyoshi Dohi, Hiroshi Iseki, Development of Surgical Manipulator System "HUMAN" for Clinical Neurosurgery, Japan Medical Association Journal, 49(11.12):335-344, 2006

##### 2. 学会発表

Ryoichi Nakamura, Shigeru Omori, Yoshihiro Muragaki, Katsuhiko Miura, Masao Doi, Ichiro Sakuma, Hiroshi Iseki, A Robotic Neurosurgery System with Autofocusing Motion Control for Mid-infrared Laser Ablation, MICCAI 2006 Medical Robotics Workshop, 5 October 2006, Copenhagen, Denmark, MICCAI2006 Workshop Proceedings, p108-115, 2006

Masafumi Noguchi, Eisuke Aoki, Daiki Yoshida, Etsuko Kobayashi, Shigeru Omori, Yoshihiro Muragaki, Hiroshi Iseki, Katsushige Nakamura, Ichiro Sakuma, A Novel Robotic Laser Ablation System for Precision Neurosurgery with Intraoperative 5-ALA-Induced PpIX Fluorescence Detection, 9th International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention -MICCAI2006-, Copenhagen, Denmark, Oct. 1-6, 2006, Lecture Note in Computer Science 4190:543-550, 2006

中村亮一、大森 繁、村垣善浩、三浦勝弘、土居正雄、佐久間一郎、伊関 洋、精密な残存腫瘍除去を実現する脳神経外科用中赤外レーザ手術ロボットシステム ―オートフォーカスレーザユニットの精度検証―、第15回日本コンピュータ外科学会大会、東京、10月27-29日、2006、論文集p213-214、2006

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2報 オクルージョン問題の回避、第15回日本コンピュータ外科学会大会、東京、10月27-29日、2006、論文集p223-224、2006

H. 知的財産権の出願・登録状況  
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）  
分担研究報告書

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>主として以下の項目について開発・評価を行った。(1)多節スライダ・リンク機構による電気メス搭載型ロボットデバイス群の開発。(2)手術デバイス誘導用多関節外套管の開発評価。(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評価。(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

腹腔鏡下外科手術で使用する術具やポート数、術中の術具交換の回数を低減させるためには、手術器具の多機能化が有効である。また、現在の腹腔鏡下外科手術においては、患部組織の血管処理を安全に、かつ迅速に行なうことが特に重要であり、そのために電気メスが頻繁に用いられている。分担研究者らは術中での多種多様な手技に対応するため、従来から開発を進めていた外径10mmの多自由度屈曲鉗子マニピュレータの多機能化として、バイポーラ電気メス機能の搭載を試みてきた。ブタを用いたIn vivo実験では、多自由度化した電気メスにより、無理な方向からアプローチすることなく、確実に血管の閉塞処理を行なえることを確認している。

そこで本年度は、より低侵襲の手技を可能とするため、このバイポーラ型電気メス屈曲鉗子マニピュレータの大幅な細径化を目的とする。また、機械的性能評価実験とIn vivo実験を通して、本マニピュレータが腹腔鏡下で確実な血管閉塞を行なえる能力を有するかどうかの評価を行う。

### A.2 手術デバイス誘導用多関節外套管の開発

内視鏡下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。これらの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る。A.2に示す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も求められる。

そこで、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の開発・評価を行う。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。

前年度までに、空気圧によるロック開閉機構を組み込んだ多関節からなる外套管マニピュレータを試作し、先端荷重について4N以上の耐荷重を有することと重力に抗して任意の形状を保つことができることを示したが、本年度においては、マニピュレータに治療用エンドエフェクタを組み込みファントム内での処置を行うための先端屈曲機構の追加および、臨床使用に向けた評価と課題の洗い出しを行う。

### A.3 デバイス誘導ロボットおよび前立腺がん治療用デバイスロボットの開発

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。そこで我々は前立腺にアプローチするためのデバイス誘導ロボットの開発および、前立腺がん治療用デバイスロボットの開発を行った。

### A.3.1 デバイス誘導のための5節リンク式ロボットの開発

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、デバイス誘導の一例として、超音波プローブによる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患部へと誘導する4自由度の位置・方向決めマニピュレータの開発・評価を行った。また、後述するMRI対応化についても合わせて検討した。

### A.3.2 前立腺がん治療用デバイスロボットの開発

がん組織切除時の組織飛散の問題を解決する手法として、TURPで用いるカテーテル先端部に凝固機能を付加し、先端部において凝固および切除を順に繰り返し行う前立腺切除用ロボットの提案・開発を行うことを目的とする。また、プロトタイプの評価及び課題の洗い出しを行う。

### A.4 手術用デバイス・マニピュレータのMRI対応化

近年、診断モダリティとして有用なMRIを術中治療に撮像し活用するInterventional MRIが行われるようになってきている。ここでは、垂直磁場型MRIに対応したロボットを開発し、基礎的評価を行うことを目的とする。

## 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) 2自由度屈曲機構の細径化

従来のリンク機構による屈曲機構は、マニピュレータ断面に対してリンクが占める割合が大きく、そのまま縮小しただけではエンドエフェクタ用の十分なチャンネルを確保できない。そこでリンク機構による駆動力伝達要素と、ワイヤロープによる多関節フレーム間の滑り防止要素を組み合わせた新たな屈曲機構を考案した。Fig. 1に示すように、3つのフレーム、2つの関節、1本のリンク節、そして2本のワイヤロープにより、 $\pm 90^\circ$ の屈曲範囲を有する滑らかな屈曲動作を実現する。先端側のFrame1と根元側のFrame3は、それぞれが持つ円弧部分が向かい合う形で、中間のFrame2により連結される。Frame2はリンクと連結され、リンクのスライド運動によって、根元側のFrame3に対して $\pm 45^\circ$ の間で回転される。このとき先端側のFrame1もFrame3に対して互

いの円弧を接触させながら運動して転がり、Frame2と同じ角度だけ回転するため、合計で $\pm 90^\circ$ の屈曲角度を得ることができる。また、屈曲動作中にFrame1とFrame3の円弧部分で生じる滑りを防止するため、両フレームを2本のワイヤロープにより、互いの円弧に沿わせ交差させつつ連結する。2本のワイヤロープを用いることで、 $\pm$ 両方向の屈曲動作における滑りを防ぐことができる。従来のワイヤ駆動とは異なり、ワイヤロープ自身は屈曲駆動時に摺動することがないため、繰り返しの屈曲動作や大きな発生力を得たい場合に、伸びや破断が生じにくく、屈曲の操作が中断される危険性が小さい。

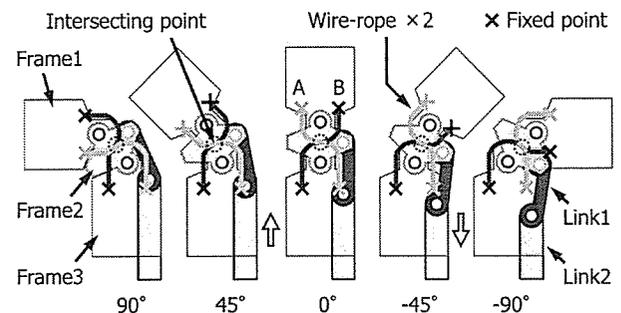


Fig. 1 1-DOF bending mechanism driven by wire-guided linkage driving method.

この1自由度屈曲機構を前後一列に2つ連結することで、垂直と水平方向に屈曲可能な2自由度屈曲機構を開発した。2本のリンクのスライド運動のみによって2自由度の屈曲機構を駆動するが、特に先端側の屈曲機構を駆動する場合は、屈曲方向が切り替わるFrame3においてリンクの回転方向を $90^\circ$ ずらす必要があるため、2軸回転可能な特殊なジョイントを介することで、独立な2自由度屈曲駆動を実現している。先端側自由度を水平面屈曲、根元側自由度を垂直面屈曲に割り当て、マニピュレータの先端部に組み込むことで、外径5mmのバイポーラ型電気メス屈曲鉗子マニピュレータを製作した (Fig. 2)。

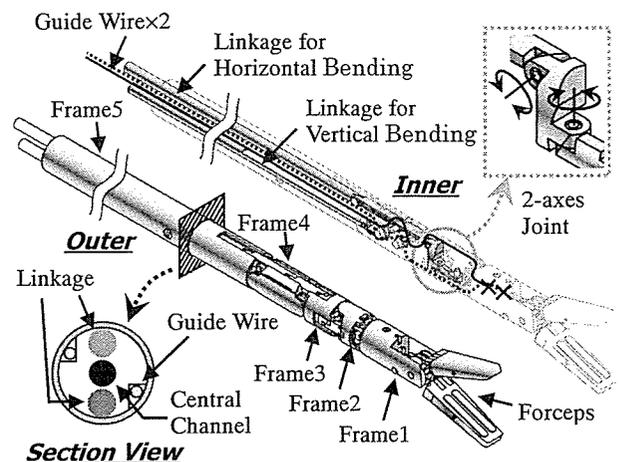


Fig. 2 Architecture of miniature 2-DOFs bending mechanism.

## (2) バイポーラ電極搭載把持鉗子機構

エンドエフェクタにはバイポーラ電気メス機能を2自由度屈曲機構の先端部に搭載した。Fig. 3に示すように2枚のブレードの把持開閉駆動は、複数のプーリーを介したワイヤの巻き取りにより行なう。バイポーラ電極を搭載したブレードはワイヤを固定した金属部分(SUS304)と電極を固定した樹脂部分(PEEK)に分割でき、完全な絶縁を図っている。バイポーラ電極の形状は従来研究や現在使用されている製品を元に、1mm×8mm×0.15mmとし、0.5mm間隔で2個並列させることで血管の閉塞性を高めた。また、電極材料にはタングステンを使用している。合計4個の電極はピンでブレードに固定しており、交換可能な構造としている。従ってブレードの樹脂部分や電極の形状や材質を変更することで、様々な手技へと対応させることができる。把持開閉用のワイヤと電極への通電ケーブルはいずれも各フレームの中心に設けたセンタチャンネルを通しており、外部へは一切露出しない構造としている。

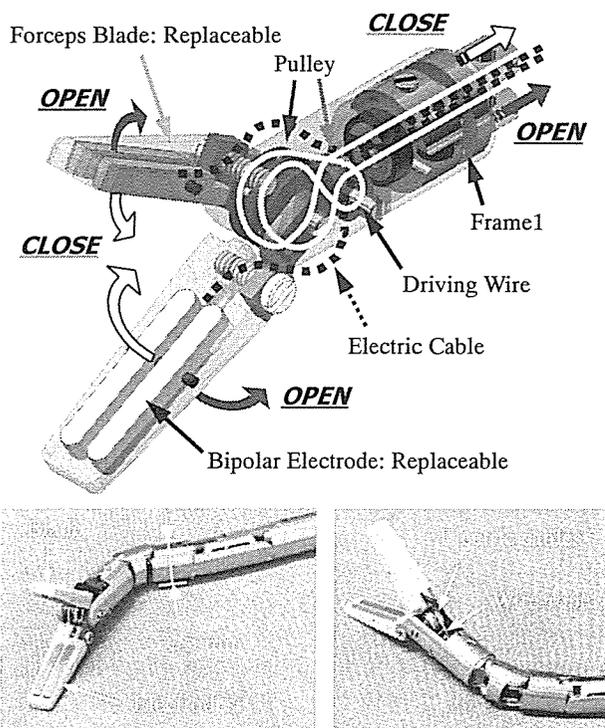


Fig. 3 Mechanism of the bipolar electric scalpel forceps.

## (3) システム構成

本マニピュレータは、従来の手術器具と同様に術者が手に持って扱う形式としている。グリップ型の操作インターフェースは、2自由度屈曲のためのリンク駆動用アクチュエータ部と隣接し、目標屈曲角度の入力を小型のジョイスティックで、鉗子の把持操作はグリップ部の開閉にて行なう。2本のリンクの駆動にはエンコーダやリニアセンサからのフィードバック情報を元にした高精度の制御を用いる。また、屈曲機構に元々含まれる遊びを補正することで、屈曲方向逆転時のヒステリシス誤差を小さく抑えている。マニピュレータ先端側の屈曲部分と直動ユニットの2つは容易に着脱可能な構造とし、術前・術後の洗浄や滅菌作業へ対応させている。(Fig. 4)

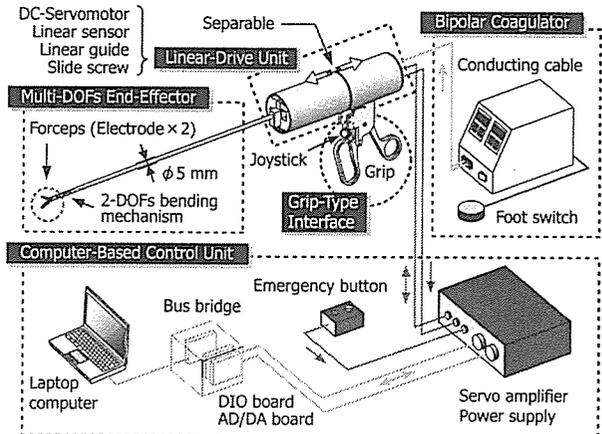


Fig. 4 System configuration of the bipolar electric scalpel bending forceps manipulator.

## B.2 手術デバイス誘導用多関節外套管の開発

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ことで全体として様々な形状に変化する。そしてスライダリンク機構と空気圧を使用することで、任意形状で形状を固定し、動力を伝達させる外套管の形状に依存せずに動力を伝えることが可能である。またサイズの異なる二種類のユニットを使用し、連結する軸の向きを交互に回転させて配置することによって三次元的な変形を可能とした(Fig. 5)。また外套管には周囲にワイヤガイドとなる孔が開けられており、一つのワイヤガイドに駆動用のより線ワイヤ及び拘束用の超弾性合金の二種類のワイヤが取り付けられる。駆動用ワイヤは外套管の先端に、そして拘束用ワイヤは先端から二番目のユニットで固定されている(Fig. 6)。駆動用ワイヤを引っ張ることで全体が変形するが、そのときに伴って移動する拘束用ワイヤの動きを外套管の根本で固定することにより、駆動用ワイヤの張力が先端のユニットにのみ作用し先端のみが屈曲する。

Fig. 7に今回試作した外套管モデルを示す。試作した外套管は長さ290mmであり、外径は16mmである。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36.9mmとなる。

## B.3 デバイス誘導ロボットおよび前立腺がん治療用デバイスロボットの開発

### B.3.1 デバイス誘導のための5節リンク式ロボットの開発

#### (1) 5節リンク式マニピュレータの設計製作

搭載するデバイスとして、前立腺がん熱凝固治療用収束超音波プローブを想定した。超音波プローブの操作に必要な自由度は、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。設計に際し、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

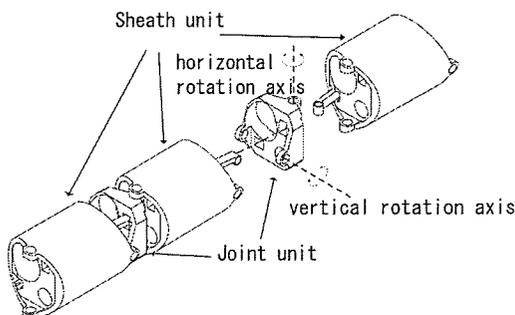


Fig. 5 Mechanism for three dimensional curves

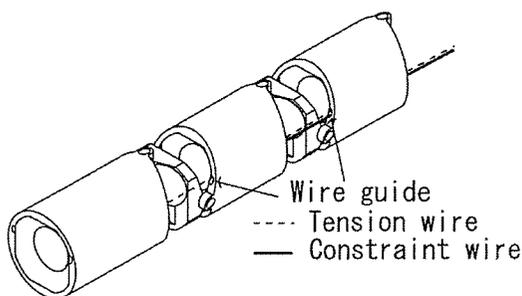


Fig. 6 Wire mechanism to bend the head unit.

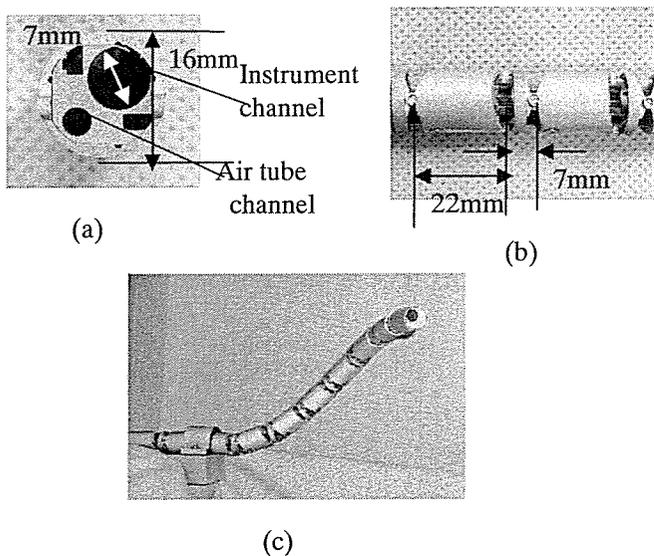


Fig. 7 Outer sheath model: a) cross section image. b) side view. c) Image that the sheath makes three dimensional curves

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。

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

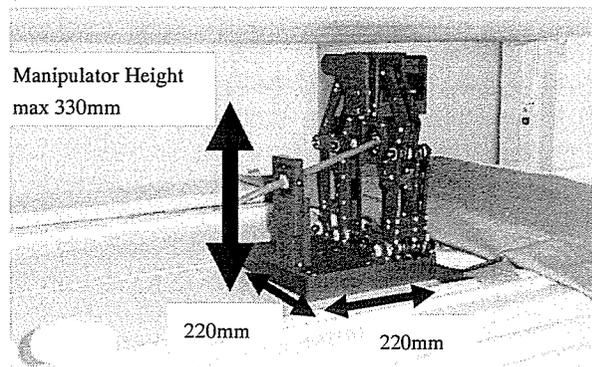


Fig. 8 Overview of MR-Compatible Manipulator For HIFU Thermotherapy inside the MRI gantry space

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。

また、MRI ガントリー内での治療を目指し、上述の機構部及び、駆動部の MRI 対応化を同時に行った。材質等の MRI 対応性については B.4 で述べる。

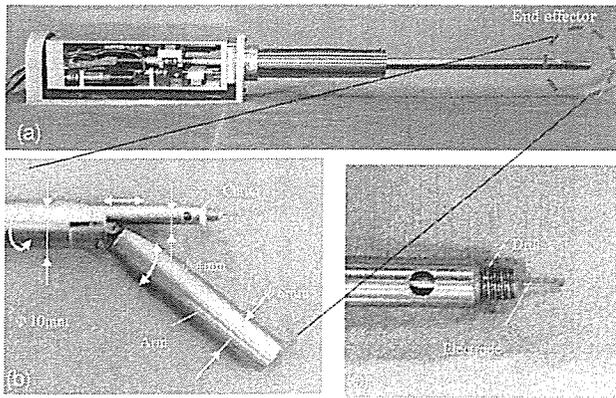
以上の機構からなる作成したマニピュレータを Fig. 8 に示す。

### 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

昨年度提案し開発した凝固・切除機構を改良し、さらにその位置決めのための屈曲機構も備えた前立腺がん治療用デバイスロボットの試作機を開発した (Fig. 9(a))。マニピュレータ先端部には、前立腺屈曲用アーム、凝固用パイポラ電極、切除用ドリルが装備されている。アームの屈曲角度は最大 45deg であり、入力最小角度は 0.1deg に設定した。カッターの挿入ストロークは 40mm であり、入力最小単位は 0.1mm に設定した。アームは、切除機構との干渉を避ける形状をしており、アームが 5deg の角度から切除機構の挿入が可能となっている。軸周りの回転は  $\pm 180\text{deg}$  以上回転することが可能であり、入力最小角度は 0.1deg に設定した。尿道に挿入するマニピュレータ先端部の直径は 10mm とした。先端に装備されているアームは直径 8mm のステンレスパイプである。挿入部全体の長さは 290mm と設定した。これは従来用いられている膀胱洗浄用器具の規格を参考に製作した。

前立腺内部に挿入する切除機構のシースは直径 4mm、内径 3.4mm のステンレスパイプを用い、先端部には直径 3mm のドリルを配置している。ドリルに回転を伝達するシャフトには直径 2mm、内径 1.4mm のステンレスパイプを用いており、この中に直径 0.4mm のステンレス線を配置し、電極に用いている。また、このパイプから灌流液を前立腺に流入させた。

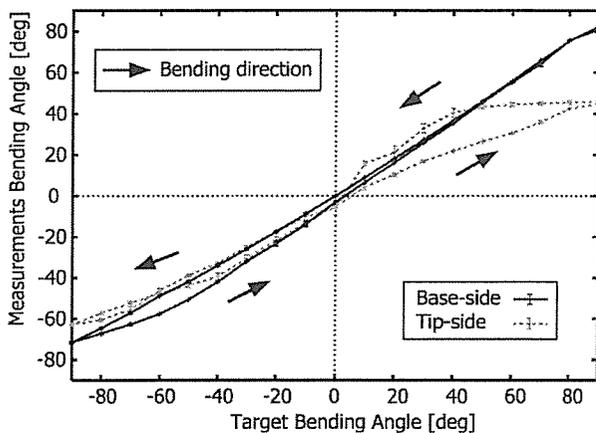
これにより、凝固した患部を切除し灌流により除去する一連の動作を自動的に行うことが出来る。



**Fig.9** (a) Prostate resection device with an end effector and the driving unit. (b) End effector of the resection device and cutter. The bending angle of the arm is 0 to 45 degrees. Rotation angle of end effector is  $\pm 180$  degrees. (c) The tip of the cutter with a drill and an electrode for cutting.

#### B.4 手術用デバイス・マニピュレータのMRI対応化

MR Compatibility の向上を目指し、非磁性材料および非磁性アクチュエータを用いたロボットの開発を行った。機構・評価に関しては B.2 を参照のこと。具体的には、高い MR 対応性を実現するために、主構造材料にはポリエステル系樹脂材料を採用した。また、強度が必要な箇所に関しては、非磁性金属材料を用いた。また、駆動部には、非磁性モータとして代表格の超音波モータ及び、精度よく減速・高出力を行う非磁性ハーモニックドライブを採用した。



**Fig. 10** Hysteresis curves of bending motion between  $\pm 90$  degrees in the bipolar electric scalpel forceps manipulator ( $N = 5$ ).

#### <倫理面への配慮>

本研究で行った動物実験は、全て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。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.1.1 性能評価実験

屈曲特性評価では、実際の駆動可能範囲、再現性、精度、ヒステリシスについて評価を行なった。屈曲自由度ごとに  $10^\circ$  刻みで、 $\pm 90^\circ$  間の屈曲と伸展を繰り返し行ない、目標角度に対する実測角度を Mean  $\pm$  SD で表現し、マニピュレータごとに Fig. 10 にヒステリシス曲線として示した。また、Table 1 に測定結果をまとめた。屈曲自由度による差は顕著であり、特に屈曲可能範囲とヒステリシス誤差において、先端側の屈曲自由度は根元側の屈曲自由度に対して低い性能を示した。一方で屈曲再現性とマニピュレータ先端位置におけるばらつきについては、いずれのマニピュレータ、自由度においても高い性能を示し、平均誤差 1 mm 以下の高精度な屈曲が可能であった。

**Table 1** Bending characteristics of the bipolar electric scalpel forceps manipulator ( $N = 5$ ).

DOF	Base-side	Tip-side
Range	$-71.6 \sim 82.3^\circ$	$-62.9 \sim 45.9^\circ$
Repeatability	$0.4 \pm 0.4^\circ$	$1.1 \pm 0.8^\circ$
Tip's accuracy	$0.2 \pm 0.3$ mm	$0.3 \pm 0.2$ mm
Hysteresis error	less than $8.8^\circ$	less than $18.8^\circ$

次に屈曲機構の上下左右への方向と、鉗子の開閉方向への発生力を評価するため、マニピュレータ先端での測定を行った。得られた発生力から屈曲トルクを算出し、結果を Table 2 にまとめた。先端側の屈曲自由度よりも根元側の屈曲自由度の方がより大きな屈曲力・屈曲トルクが得られた。また鉗子の把持力については、体組織の把持に適した性能を有することを確認した。

**Table 2** Generated force and torque of the bipolar electric scalpel forceps manipulator ( $N = 10$ ).

DOF	Direction	Tip's Force [N]	Torque [Nmm]
Vertical	0 to $+90^\circ$	$6.61 \pm 0.35$	$253.5 \pm 13.4$
	0 to $-90^\circ$	$6.28 \pm 0.35$	$240.8 \pm 13.7$
Horizontal	0 to $+90^\circ$	$1.82 \pm 0.04$	$41.50 \pm 0.96$
	0 to $-90^\circ$	$1.89 \pm 0.14$	$43.19 \pm 3.18$
Forceps	Close	$3.70 \pm 0.19$	$29.54 \pm 1.50$
	Open	$4.79 \pm 0.38$	$38.26 \pm 3.06$

#### C.1.2 In vivo 実験

ブタ (38kg, オス) を用いた In vivo 実験では、バイポーラ型電気メス屈曲鉗子マニピュレータを用いて腸間膜へのアプローチを行なった。コアギュレータ (MIZUHO Co., Ltd., MICRO-3Plus) の設定は、周波数 1MHz (非周期的正弦波)、出力 20W、焼灼時間を 1sec とし、血管を含む組織の凝固、並びに血管閉塞能力の評価を行なった (Fig. 11)。また、凝固した組織断面の顕微鏡観察を行ない、組織の凝固や血管閉塞を行なえる能力を有することを確認したが、把

持ち通電した際のブレード位置により、組織の凝固性能に若干のばらつきが見られた (Fig. 12).

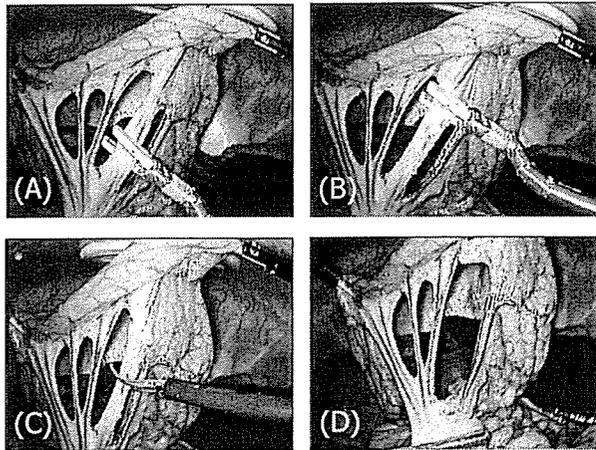


Fig. 11 Sealing another mesenteric part including blood vessels. (A) and (B) Coagulating both ends of the vessel with 2-DOFs bending motion. (C) and (D) Confirming blood vessels' occlusion by cutting middle part of the coagulated both ends.

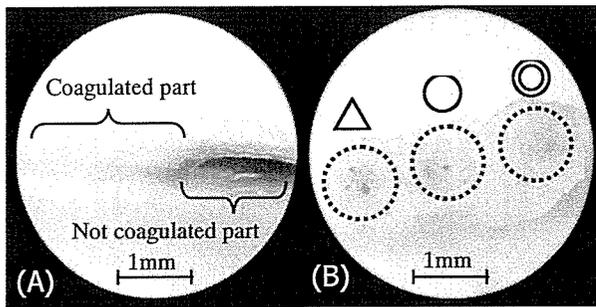


Fig. 12 Cutting surface of coagulated mesenteric tissue including vessels. (A) Axial cross section of a vessel which is the boundary between coagulated and not-coagulated parts. (B) Tissue which was grasped and coagulated from the right side. At forceps' tip-side, the third vessel's occlusion was not completed.

## C.2 手術デバイス誘導用多関節外套管の開発

### C.2.1 機構の特性評価実験

試作したモデルに対し、体内を模擬した通路への進入性能に関する評価実験を行った。使用した模擬材料としては生体軟組織と同等の弾性率を持つシリコーンゴムを使用し、特定の半径を持つ円弧と直線を組み合わせた通路への挿入を試みた。その結果屈曲半径が 50mm 以上の湾曲であれば外套管が進入することが可能であった。また体内進入の際に起こりうる分岐による進路選択が必要な通路においても先端屈曲機構を用いることで目的の通路を選択して挿入させることが可能であった (Fig. 13).

### C.2.2 In vivo 実験

動物 (ブタ, 38kg, オス) を使用しての評価を行った。今回の実験では気腹下で行い、腹部中央あたりから外套管マニピュレータを挿入、腹膜下部から挿入された内視鏡によって外套管の様子を確認しながら外套管が肝臓における肝葉同士の隙間及び腹腔の横隔膜側の肝臓と腹膜との隙間への外套管の進入

を試みた。Fig. 14 に内視鏡からみた外套管の腹腔での様子を示す。この図では外套管の先端が見えておらず、外套管が腹腔鏡では見えない部分に到達していることが認められる。このように外套管を操作することで臓器同士の隙間や臓器と膜の間など体内の深部にある狭い領域へ到達させることが可能であることを確認した。

## C.3 デバイス誘導ロボットおよび前立腺がん治療用デバイスロボットの開発

### C.3.1 デバイス誘導のための 5 節リンク式ロボットの開発

機構の評価に関する評価: 前立腺を押し下げる方向で駆動を行う際に想定される約 0.5kg の負荷を加えた状態でのプローブ先端位置決めへの繰り返し精度は約 1.0mm であった。これにより、マスタースレーブ方式で処置を行う場合において高い操作性を有することが示されたが、採用する超音波プローブの性能等によっては精度向上による駆動領域の拡大が必要である。

MRI 対応性に関する評価として、MRI ガントリ内に開発したマニピュレータを設置し、駆動した状態での MR 画像の S/N 比を計測した。S/N 比の低下は数パーセント以下であり、大きな歪みも確認されなかった。これにより、十分な MR-Compatibility を有することが示された。

### 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

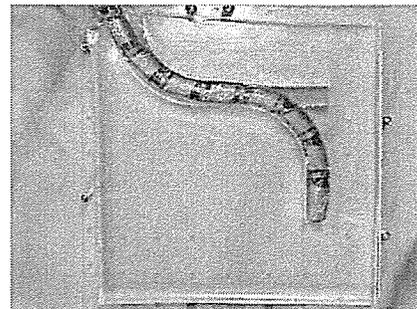


Fig. 13 The sheath went through the branched route selecting the curved course



Fig. 14 Images of in vivo experiment. The sheath went into the gap between liver and diaphragm.

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。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  
MRI 対応化の評価については, C.3.2 において示した通りである。

## 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

本研究ではリンク機構とワイヤ機構を融合することで屈曲機構の細径化を実現し, 外径 5mm のバイポーラ型電気メス屈曲鉗子マニピュレータを開発した。性能評価実験では広い屈曲範囲・高い再現性・大きな発生力を有することを確認し, 内視鏡下手術用鉗子マニピュレータの性能向上に大きな役割を果たすことを示した。また, In vivo 実験では腸間膜上の血管を複数閉塞できることを確認した。今後は特に先端側自由度における屈曲機構と把持機構の改善に努め, マニピュレータの使用感向上のため, 軽量化やインタフェースの操作性, メンテナンス性などについても検討を進める。

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進入し形状固定を行うための外套管に対して三次元に湾曲を可能にするための機構と, 先端屈曲機構を開発し, 外套管への追加を行った。そして模擬通路を利用した挿入性の評価実験を行った結果屈曲半径が 50mm 以上のへの進入することが可能であった。そして動物実験を行った結果従来の内視鏡機器が届かない領域への進入, および機器の誘導が可能であることを確認した。

D.3 デバイス誘導ロボットおよび前立腺がん治療用デバイスロボットの開発

D.3.1 デバイス誘導のための 5 節リンク式ロボットの開発

本年度の結果より, 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, ファントム実験により臨床使用における問題点の洗い出しおよび改良を行う。

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

経尿道的にがん組織を壊死させながら機械的に少量ずつ切除する治療デバイスのプロトタイプ開発を行ったが, 今後は, 細径化およびファントム実験等による評価を行い, 有用性を明らかにする。

D.4 手術用デバイス・マニピュレータの MRI 対応化

MR Compatibility については, 5 節リンク式マニピュレータの開発によりその実現性の評価を行ったが, 今後はロボットの駆動による SN 比低下・画像の歪みの補償も含めた検討が今後必要である。

## F. 研究発表

F.1 論文発表

特になし。

F.2 学会発表

1) H. Yamashita, K. Matsumiya, K. Masamune, E. Kobayashi, I. Sakuma, H. Liao, M. Hashizume, T. Dohi: Feasibility Analysis of Bipolar Electric Scalpel Forceps Manipulator with 2-DOFs Bending Mechanisms, Proceedings of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2006 (WC2006, Aug. 27 - Sep. 1, 2006 COEX Seoul, Korea), IFMBE Proceedings, Springer, Volume 14, pp2980-2983, 2006.

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: バイポーラ型電気メス屈曲鉗子マニピュレータの細径化, 第 15 回日本コンピュータ外科学会大会・第 16 回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集, pp. 99-100, 東京, October 2006.

3) Yagi A, Matsumiya K, Masamune K, Liao H, Dohi T: Rigid-flexible outer sheath device using slider linkage and air pressure locking mechanism for laparoscopic surgery, Proceedings of 20th International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2006), Osaka, Japan, June 28- July 1, 2006. p.508.

4) 神垣剛, 松宮潔, 正宗賢, 廖洪恩, 橋爪誠: 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, 第 45 回日本生体医工学会大会(福岡国際会議場, 福岡. 2006 年 5 月 15-17 日) 論文集, p.397.

5) 西澤暁, 松宮潔, 正宗賢, 廖洪恩, 土肥健純: 前立腺がん凝固後切除マニピュレータの基礎的開発, 第 45 回日本生体医工学会大会(福岡国際会議場, 福岡. 2006 年 5 月 15-17 日) 論文集, p.398.

## 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。本年度は昨年度試作したインフォームド・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ディスプレイシステムのテストベッドの改良、ならびに光学系の改良設計を行った。

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。昨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。本年度は昨年度に構築したテストベッドシステムに関して改良を施すとともに、投影光学系の改良設計を行い、最終システム構築の準備を整えた。

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、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」の実装を目指した。

## 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、平成17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)

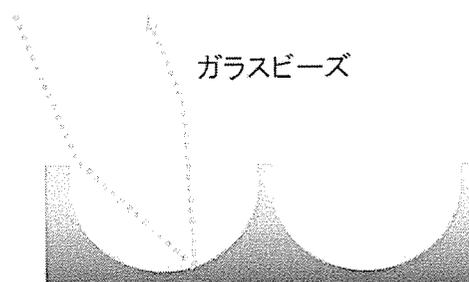


図2 ビーズ式再帰性反射材

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使い、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)

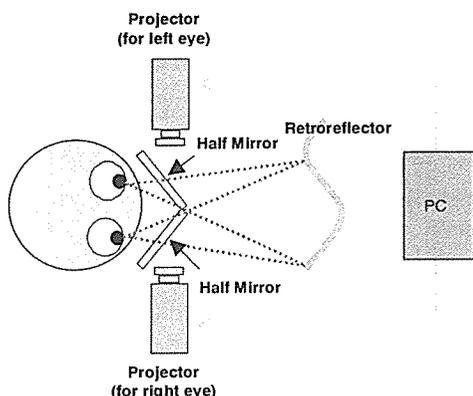


図3 RPTの構成図

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。本年度は昨年度試作したテストベッドの改良版である X'tal Scope システムを構築し、また、RPT 技術における投影系の光学系の改良設計を行った。

#### B-3-1 X'tal Scope のシステム構成

X'tal Scope のシステム構成は図4のようになっている。X'tal Scope 本体は5自由度のアームと、頭部に設置された2台のプロジェクタから成る。アームの自由度配置を図5に示す。アームの各関節に配置されたエンコーダの値から観察者の視点位置及び視線方向を計算し、それに応じた映像を、観察者の視点と光学的に共役な位置に置かれた2台のプロジェクタによって再帰性反射材のスクリーンへ投影する。これによってバーチャルな物体があたかもスクリーン位置に存在するかのように、立体感を持って提示することができる。

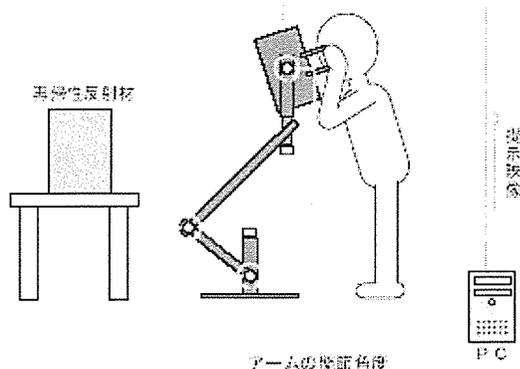


図4 X'tal Scope システム構成