

- 9) Takashi Suzuki, Youichi Katayama, Etsuko Kobayashi, Ichiro Sakuma: Compact Forceps Manipulator Using Friction Wheel Mechanism and Gimbals Mechanism for Laparoscopic Surgery, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI 2005, Part II, Lecture Note in Computer Science 3750, pp.81-88(Poster), 2005
- 10) M.Noguchi, E.Aoki, E.Kobayashi, S.Omori, Y.Muragaki, H.Iseki, I.Sakuma: Development of a Compact Automatic Focusing System for a Neurosurgical Laser Instrument, The First International Conference on Complex Medical Engineering(CME2005):74-79(Orl),2005,Takamatsu
- 11) E.Aoki, E.Kobayashi, I.Sakuma et al.: System Design for Implementing Distributed Modular Architecture to Reliable Surgical Robotic System, Proceedings of 7th International conference, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI 2004, Part II, Lecture Note in Computer Science 3217, 184-191,2004
- 12) 吉村雄祐, 蓮尾健, 小林英津子, 伊関洋, 中村亮一, 佐久間一郎: 超音波凝固切開装置を搭載した多自由度屈曲鉗子における先端回転制御法シミュレーションおよび評価. 第16回日本コンピュータ外科学会大会 第17回コンピュータ支援画像診断学会大会 合同論文集: pp37-38, 2007.
- 13) 芦田秀一, 小林英津子, 佐久間一郎: 超弾性合金を用いた多自由度屈曲鉗子の開発. 第16回日本コンピュータ外科学会大会 第17回コンピュータ支援画像診断学会大会 合同論文集: pp45-46, 2007.
- 14) 王凱濠, 安藤岳洋, 島谷浩二, 野口雅史, 青木英祐, 廖洪恩, 小林英津子, 丸山隆志, 村垣善浩, 伊関洋, 佐久間一郎: 脳神経外科手術支援のための手術ナビゲーションシステムに関する研究. 第16回日本コンピュータ外科学会大会 第17回コンピュータ支援画像診断学会大会 合同論文集: pp117-118, 2007.
- 15) 安藤岳洋, 島谷浩二, 野口雅史, 小林英津子, 丸山隆志, 村垣善浩, 伊関洋, 佐久間一郎: 5-ALA誘導 PpIX を用いた術中局所的脳腫瘍識別システムに関する研究. 第16回日本コンピュータ外科学会大会 第17回コンピュータ支援画像診断学会大会 合同論文集: pp137-138, 2007.
- 16) 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2報). 第16回日本コンピュータ外科学会大会 第17回コンピュータ支援画像診断学会大会 合同論文集: pp147-148, 2007.
- 17) 島谷浩二, 野口雅史, 小林英津子, 丸山隆志, 村垣善浩, 伊関洋, 佐久間一郎: 5-ALA誘導型PpIXによる蛍光画像を用いた脳腫瘍の術中同定に関する研究. 第16回日本コンピュータ外科学会大会 第17回コンピュータ支援画像診断学会大会 合同論文集: pp159-160, 2007.
- 18) C.Chui, I.Sakuma: Topology Independent Model for Medical Robotic simulation. 第16回日本コンピュータ外科学会大会 第17回コンピュータ支援画像診断学会大会 合同論文集: pp177-178, 2007.
- 19) 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
- 20) 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
- 21) 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: MR I 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
- 22) 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
- 23) 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
- 24) 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)
- 25) 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
- 26) 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
- 27) 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
- 28) 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
- 29) 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
- 30) 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
- 31) 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.
- 32) 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
- 33) 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
- 34) 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.
- 35) 佐久間一郎, 朱志光, 小林英津子, 陳猷, 久田俊明: 肝臓力学特性の実験的検討と構成式の導出, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会/第 14 回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集: 225-226, 2004
- 36) 清水一秀, 小林英津子, 丸山隆志, 村垣善浩, 伊関洋, 佐久間一郎: 5-Aminolevulinic Acid 誘導による蛍光画像を用いた術中脳腫瘍同定, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会/第 14 回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集: 177-178, 2004
- 37) 青木英祐, 鈴木孝司, 小林英津子, 波多伸彦, 土肥健純, 小西晃造, 橋爪誠, 佐久間一郎: CORBA を用いたプラットフォーム下におけるリアルタイム非同期通信によるパフォーマンスの評価, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会/第 14 回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集: 157-158, 2004
- 38) 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, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会/第 14 回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集: 35-36, 2004
- 39) 古瀬慶博, 砂田文宏, 秋山朋之, 八木昭彦, 青木英祐, 波多伸彦, 佐久間一郎: CORBA を用いたネットワーク対応型医用機器の開発と Latency の測定, 情報処理学会研究報告, 2004-EVA-8(9): 49-54, 2004

- 40) 清水一秀, 小林英津子, 丸山隆志, 村垣善浩, 伊
関洋, 佐久間一郎: 5-Aminolevulinic Acid(5-ALA)
を応用した術中腫瘍同定 - 半導体レーザと光
ファイバを用いた局所計測法, 第12回日本コ
ンピュータ外科学会大会 / 第13回コンピュ
ータ支援画像診断学会大会 合同論文集,
197-198,2003

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(H15～18年度) 村垣 善浩(H18～19年度)

東京女子医科大学 先端生命医科学研究所

研究要旨 術中に高品位の診断画像を取得できる OpenMRI 手術室において、術中情報に基づく精密な手術を行う手術ロボティクス環境についての研究を行った。対象を悪性脳腫瘍摘出術とし、1)デジタル 3D 手術室データによる手術室内機器・人員配置シミュレーションシステム、2)遠隔からの術中情報モニタリング及び手術戦略支援を実現するシステム、3)中赤外光レーザーによる微細エッチング腫瘍蒸散を実現するレーザーロボットシステム、について研究を行い、OpenMRI 誘導下脳腫瘍ロボット治療環境の構築を達成した。

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)を鑑みたとでの手術ロボット設計が不可欠である。

2) 医療情報の遠隔モニタリング

上記の機能的制限により術者が術中に患者から離れる場合においても、患者にとって安全な治療環境を維持するために必要な、遠隔監視システムが不可欠である。

3) 手術ロボット・マニピュレータの多機能・高機能化

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。

本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3要素に対し、具体的に以下の方法で研究を行った。

1) 手術ロボット形状・配置の最適化

1-1) 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。しかし手術中にどの位置にどの機器を配置すればよいかについては術者・スタッフ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った。

1-2) 死角低減のための複数カメラを備えたナビゲーションシステム

光学式位置計測装置を用いた手術ナビゲーションシステムの問題点として、光学式位置計測装置のカメラと患者術部との間に視界を遮る人や物が存在すると使用不可能になる。さまざまな機器、人員の存在する手術室においてナビゲーションシステムを配置するスペースは限られた狭い範囲しか存在せず、光学式位置計測装置のカメラを固定できる範囲も限られてしまい患者術部に配置されたマーカを認識できるカメラ固定位置を検索することに多くの時間を消費してしまう。また、手術の際に執刀者の腕によりカメラ視野を遮ることもあり円滑にナビゲーションシステムを使用することが困難であった。

そこで、本研究では光学式位置計測装置を複数台設置し、死角の無いナビゲーションを実現するために、

a) 安価で複数台同時計測の可能なサイヴァース社製ステレオラベリングカメラ（以下SLCと称す）を使用し、現在ナビゲーションシステムで使用しているPolaris(Northern Digital Inc)の代用として使用できるかどうか検討するため、SLCの精度評価・関する調査を行った。

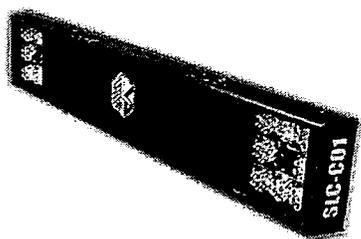


Fig.1 ステレオラベリングカメラモジュール
(サイヴァース社製)

b) USB通信仕様かつ小型で術野周辺への設置自由度の高いPolaris互換機であるPolaris Vicra(Northern Digital Inc)とPolarisを併用したナビゲーションシステムを構築するためのソフトウェア開発研究を行った。

2) 医療情報の遠隔モニタリング

2-1) Ethernetを介した遠隔患者情報モニタリングシステムの構築

術中に管理すべき情報としては、麻酔・バイタル・術場映像・医用画像・ナビゲーションを始め多くのものがあるが、本研究では患者のバイタル情報とカメラによる術場周辺映像の2つをネットワークを介して管理する、小型遠隔モニタリングユニットを開発・試作し、臨床での検討を行った。

システムはPC、カメラ、患者モニタからなる。患者モニタには日本光電社製ベッドサイドモニタBSM-2401を用い、心拍・心電・CO2分圧のモニタを備えた。患者の映像・音声はマイクとUSB接続小型PCカメラを用いて取得した。ネットワークを介してのこれら情報のモニタにはMicrosoft社製NetmeetingとRealVNC社製RealVNCを用い、映像・音声については患者と術者との双方向コミュニケーションを可能とした。図に遠隔モニタリングのシステム概略を示す。

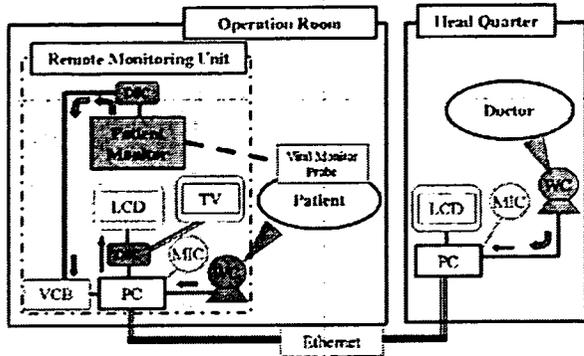


Fig. 2 遠隔モニタリングシステム構成図

小型遠隔モニタリングユニット (Remote Monitoring Unit) で取得した患者バイタル情報はベッドサイドモニタからダウンスキャンコンバータ (DSC) ビデオキャプチャボード (VCB) を介してユニット内PCに取り込まれる。ユニット内PCからのバイタル情報、患者映像・音声は、Ethernetを介して遠隔(手術室外)の医師サイドのPCに送られ、表示される。

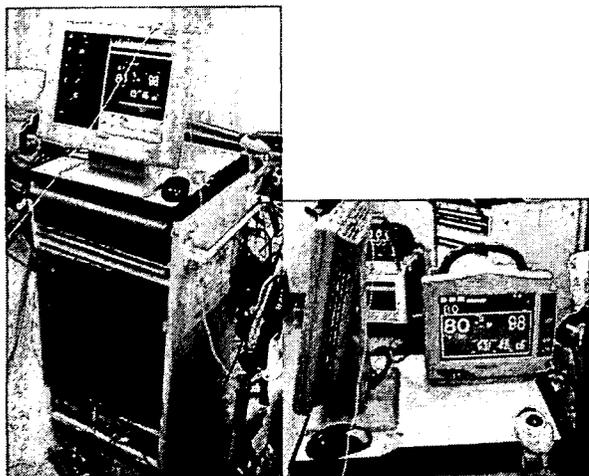


Fig. 3 小型遠隔モニタリングユニット (Remote Monitoring Unit)

手術場及び病棟でのベッドサイドでのモニタリングを考慮し、床頭台内にアイソレーショントランス、PC、ダウンスキャンコンバータ等を備える。ベッドサイドモニタと小型PCカメラ、マイクの情報をPC・ネットワークを介して遠隔監視拠点に配信する。

臨床での有用性検討を図るために、放射線被爆

下の治療であるガンマナイフにおける遠隔バイタルモニタリングを試験的に施行した。ガンマナイフでは治療中、治療室内が放射線被爆環境になるために患者以外の人間は室外に退避するため患者が室内に孤立する。状態の悪い患者や全身麻酔下での症例では、治療中の患者状態(バイタル・概観)の情報を室外からモニタすることが必要不可欠である。図に本症例での遠隔モニタリングシステム概略を示す。

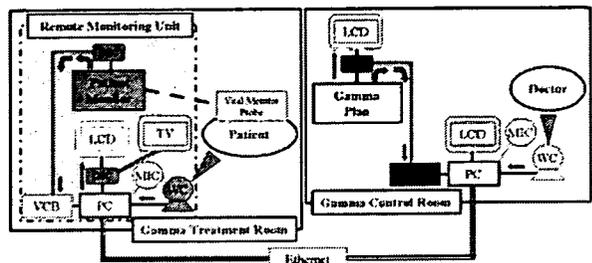


Fig. 4 ガンマナイフ治療用遠隔モニタリングシステム構成図

基本構成はFig1に順ずる。本例では、他の遠隔拠点(学内研究室など)からの治療支援が可能となるように、ガンマナイフ治療計画装置 (Gamma Plan) の映像をDSC・VCBを解してコントロールルームサイドのPCに取り込み、遠隔に治療計画を確認可能にした。

2-2) Ethernetを介した遠隔患者情報提示・操作システム「手術戦略デスク」の構築

本研究では上記の遠隔バイタルモニタリングシステムはさらにシステムを発展させ、OpenMRI手術室内での映像・音声・機器情報の遠隔モニタ及び機器の操作を可能にするための遠隔側モニタリング・操作制御システム「手術戦略デスク」の構築を行った。

基本的なシステムは2-1)と同様、PC、カメラ、患者モニタからなる。手術室内の映像・音声、及び患者のバイタル情報の獲得にはマイクとUSB接続小型PCカメラ、及び小型CCDカメラを設置した。CCDカメラは術場内の全景、術野、麻酔器のモニタ、ナビゲーションシステム映像を取得し、PCの

ビデオスキャンボードに取り込まれる。遠隔で取得可能な映像チャンネルは現在1入力のみであるため、遠隔側から適宜映像チャンネルをネットワークを介して変更できるよう、LAN経由で入力・出力対応を変更できるマトリックススイッチャを介してPCへの映像取り込みを行った。

これら情報の遠隔地でのモニタにはMicrosoft社製NetmeetingとRealVNC社製RealVNCを用い、映像・音声については患者と術者との双方向コミュニケーションを可能とした。またRealVNCの遠隔モニタ・操作機能により、術場内PC及びMRI装置の遠隔操作を可能にした。図に戦略デスクのシステム概略を示す。

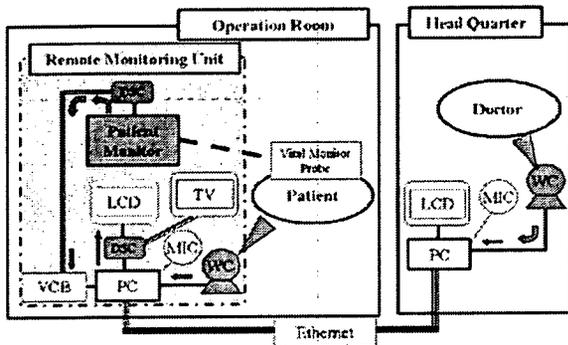


Fig. 5 遠隔モニタリングシステム構成図

小型遠隔モニタリングユニット (Remote Monitoring Unit) で取得した患者バイタル情報はベッドサイドモニタからダウンスキャンコンバータ (DSC) ビデオキャプチャボード (VCB) を介してユニット内PCに取り込まれる。ユニット内PCからのバイタル情報、患者映像・音声は、Ethernetを介して遠隔(手術室外)の医師サイドのPCに送られ、表示される。

臨床での有用性検討を図るために、悪性神経膠腫摘出術において、遠隔モニタ・及び操作を行った。

3) 手術マニピュレータの多機能・高機能化

3-1) 多自由度超音波凝固切開マニピュレータの開発・試作

医師に新たな手の技術を提供する手術ロボット・マニピュレータの研究は広く行われており、Intuitive Surgical社のda Vinciを始めとして実際の臨床に応用されたものも存在する。これらの手術マニピュレータの特徴の一つは、術具先端の自由度を向上することにより従来の手技では不可能であった高いアプローチ自由度、Dexterityを低侵襲に実現することである。現在把持鉗子、鉗、メスを始め電気メスについてもこの技術が応用され、手術マニピュレータシステムに搭載されている。

一方、現在の超音波凝固切開装置は超音波振動子のサイズが大きいため直線形状にならざるを得ず、処置部へのアプローチはトロッカー挿入方向の直線的なアプローチのみとなり、手術手技に大きな制限をもたらしている。このような問題を解決するために、超弾性合金を用いたフレキシブルな超音波伝送線路に関する研究が行われているが、十分な振動振幅が得られていないのが現状である。

我々はこの問題を解決するために、小型超音波振動子を用いた多自由度超音波凝固切開装置の開発を行っている。本研究ではこの多自由度超音波凝固切開装置のマニピュレータ化に取り組み、2自由度のメカトロニクス制御を試みた。



Fig. 6 多自由度超音波凝固切開装置

小型振動子：電歪型振動子を用い、チタン合金製の円形ホーンにて振動振幅の増幅を行う。ケース外形φ12mm、62kHz/50μm(振動周波数/最大振動振幅)。屈曲部：±90°の屈曲2自由度を有する。アルミニウム製。

3-2) OpenMRI対応レーザー手術ロボットシステムの開発

我々はこれまで、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ー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誤差 0.5mm 以下で蒸散スポット径約 0.3mm と、高精度・分解能の腫瘍除去が行えることを確認している。

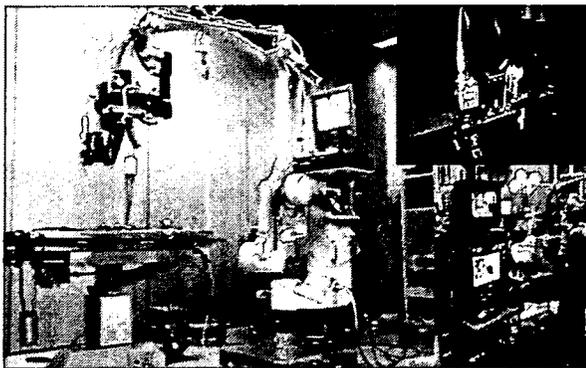


Fig. 7 OpenMRI対応レーザー手術ロボットシステム
左：全体図。MRI対応顕微鏡架台にレーザーユニット・画像ユニットを備える。右上：今年度製作したレーザー・AFユニット。右下：レーザー手術ロボットコントロール装置。

本研究事業においては、このOpenMRI対応レーザー手術ロボットシステムの技術開発として以下の研究を行った。

a) 止血システムの開発：本装置の特長は、中赤外波長領域の低出力レーザー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、一方で大きな凝固能力は期待できない。このため、ブタを用いた開頭下での動物実験においては、ビームスポットが血管を横切った際に血管壁を損傷して出血を引き起こすことで、その後の蒸散プロセスが中断されることが課題となっていた。こうした場合、一旦出血が起こると、非接触での凝固止血には困難が伴い、

血液成分にレーザー光が吸収されて発生する炭化層のため、組織中の水分吸収を利用している本レーザーにおいては、それ以降の蒸散エッチング行えなくなることが判明している。本レーザーシステムを用いたOpenMRI誘導下脳腫瘍手術プロトコルとして、蒸散エッチングを行う前段階において、指定領域内に存在する血管を予め凝固しておき、十分な止血処置を行った上で表層よりのエッチングを行う方法を試みた。その目的に従って、レーザー照射条件の最適化を行い、ブタを用いた検証実験を行った。

b) 5-ALA腫瘍蛍光同定による選択的自動治療機能の開発：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ー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半導体レーザーと蛍光取得用ファイバをレーザー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、レーザー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康豚において、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、健康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。

c) 術中診断情報に基づく手術計画を可能とする診断情報の統合表示システムの開発：レーザー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。

本レーザー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、画像上にレーザー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、レーザー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データをレーザーロボ

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、レーザーヘッドと照射対象(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、レーザーヘッドの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)

1)に関して：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：本例ではネットワークを介した患者情報のやり取りを行うに際し、ファイアウォールを備え院外との情報伝達を遮断した院内ネットワークを用いた。また、P2P通信ソフトウェアベースにセキュリティに十分に配慮した。また治療について患者に説明しインフォームドコンセントを得ている。

3)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

1-1) 3D CADを用いた手術機器の4次元配置最適化システムの構築-

東京女子医科大学インテリジェント手術室(OpenMRI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台の无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无影灯を配置した。その結果、2台の无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. 8, 9)

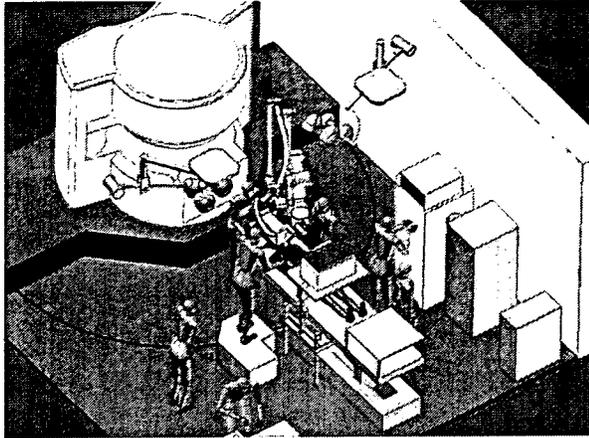


Fig. 8 OpenMRI手術室内機器・人員の3Dデジタルデータ化

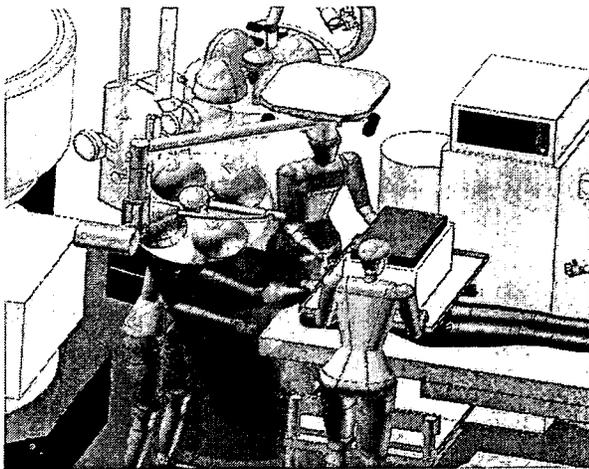


Fig. 9 3D-CADによる无影灯照明領域(黄色円筒部分)の最適配置シミュレーション

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。(Fig. 10)

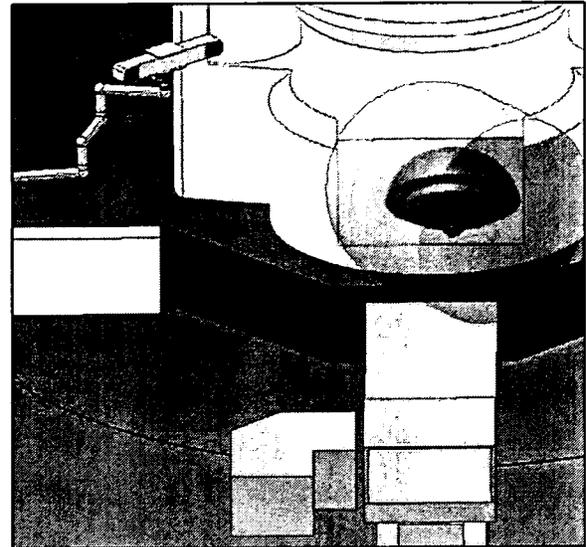


Fig. 10 計測範囲ベースのPolaris最適配置法。左上：患者頭部モデルとマーカつき術具モデル、右上：術具マーカの駆動軌跡のモデル化、下：最適配置状態。Polarisの計測範囲(黄色モデル)内に術具マーカ駆動軌跡(緑モデル)が収まっている。

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。

(ア)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。

(イ)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

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。

(ウ)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、患者開頭部位置を入力し、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。

(エ)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。

東京女子医科大学インテリジェント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。

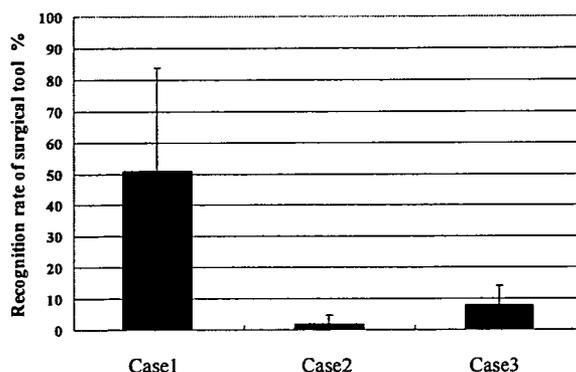
結果を表に示す。どの症例でも認識率は低く、またかなりのばらつきがある。人気率の低下には、

- 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パ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。

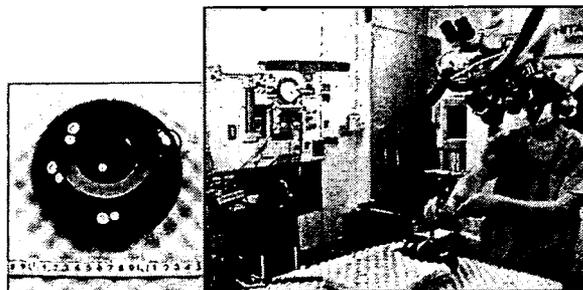
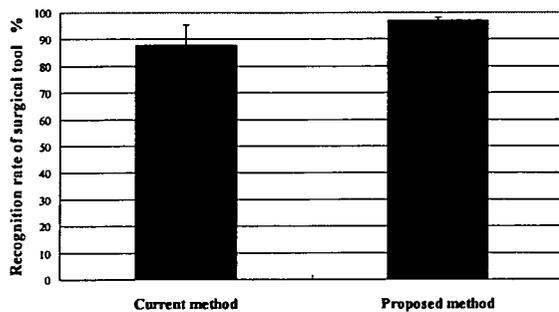


Fig.11 術具認識率計測実験。左は頭部ファントム。

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



1-2) 死角低減のための複数カメラを備えたナビゲーションシステム

a) ステレオラベリングカメラの精度検証

ステレオラベリングカメラ (SLC) の精度を検証するために、Fig. 10にあるような精度測定実験装置を作成し、カメラ単体での精度について測定を行った。

測定の結果、視野の中心から離れるほど大きく計測値にずれが生じていることがわかる。また、Table. 1から奥行き距離が176 cmの時に最大誤差が10.09cmと非常に大きい誤差になった。現在使用しているPolarisの計測誤差は約0.35mmであることを考えるとSLCはこのままナビゲーションシステムに使用してもレジストレーション誤差が大きく出てしまい使用することはできないことが明らかとなった。

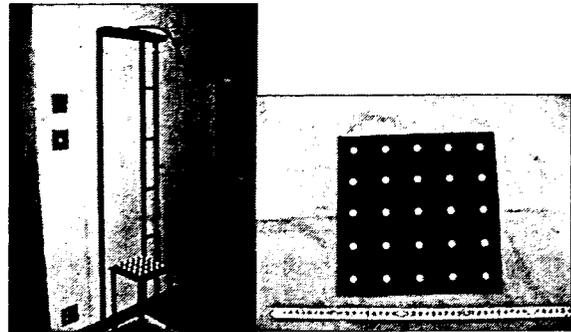


Fig. 12 SLC精度検証装置。右：精度測定版。反射球マーカを50mm感覚で設置。左：設置全体図。下に精度測定版、上部にSLCを設置し、相対距離を変化させながら精度の測定を行った。

Table. 3 相対距離と最大誤差

相対距離 (cm)	最大誤差 (cm)
56	1.365
104	5.272
176	10.09

b) PolarisとPolaris Vicraを併用したナビゲーションシステム

Fig. 13にソフトウェア制御画面を示す。本モジュールを用いることにより、ナビゲーションシステムはPolaris・Polaris Vicra双方からの座標姿勢情報を取得することが可能である。

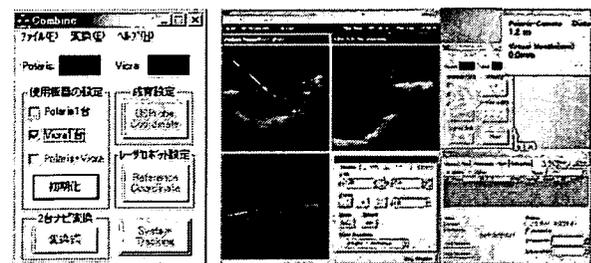


Fig. 13 Polaris/Polaris Vicra 併用計測における位置姿勢情報変換統合モジュール(左)とモジュール制御下で駆動するナビゲーション(右)

2) 医療情報の遠隔モニタリング

2-1) Ethernetを介した遠隔患者情報モニタリングシステムの構築

ダウンスキャンコンバータ・ビデオキャプチャボードを介したPCに入力されたベッドサイドモニタ上の患者バイタル情報は、PC(遠隔モニタリングユニット)上で数値をリアルタイムに確認するに十分な解像度と更新速度を備えている。

ネットワークを介した遠隔モニタリングでは、画面更新速度がやや遅いため、波形の経時的な観察にはやや問題を有している。

ガンマナイフ治療での臨床応用では、ダウンスキャンコンバータ・ビデオキャプチャボードを介したベッドサイドモニタ画面出力の入力と、小型PCカメラを用いたベッドサイドモニタ画面の撮影の両方を施行した。

結果としては共に画質・リアルタイム性とも臨床に使用するに十分な性能を発揮したが、先に述べたように波形の経時的な観察には更なる検討が必要と思われる。

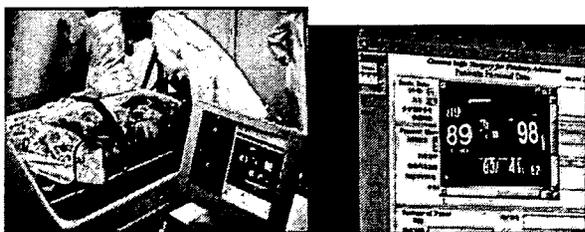


Fig. 14 臨床での遠隔モニタリング

左図：準備の様子(本学ガンマナイフユニット治療室)。患者ベッドサイドに遠隔モニタリングユニットを配置する。本図ではベッドサイドモニタの画面を小型PCカメラにて撮影し、ユニットのPCのLCD上に表示している。

右図：ガンマナイフコントロール室に配置したPC上でのモニタリングの様子。すべてのバイタル情報について、リアルタイムにモニタリングを行うことができる。

2-2) Ethernetを介した遠隔患者情報提示・操作システム「手術戦略デスク」の構築

本研究にて試作を行った遠隔側のモニタリン

グ・操作制御システムをFig. 15に示す。



Fig. 15 遠隔モニタリング・操作制御システム「手術戦略デスク」。中央の大画面で術場内カメラ映像をモニタリングする。左側画面ではMRIコンソールのディスプレイを提示し、システムの操作及び画像閲覧が可能である。右側のディスプレイではその他術場内PC装置(データストレージ、ナビゲーション、術中誘発反応測定解析装置など)について、MRI装置と同様のモニタリング・操作が可能である。

2-1)の遠隔モニタシステムとの大きな違いとしては、

- ・ 映像入力(カメラ映像)を16チャンネルを増やし、手術室内の多角的な映像情報、および機器画面上に示される術中情報のモニタリングを可能にした。
- ・ OpenMRI及び術場内PC機器(データストレージ、ナビゲーション、術中誘発反応測定解析装置など)については画面のモニタリングのみではなく、デスクからの直接操作を可能にした。

といった点がある。

基本的な性能としては、2-1)の臨床Trial結果と同様、ダウンスキャンコンバータ・ビデオキャプチャボードを介したPCに入力されたベッドサイドモニタ上の患者バイタル情報は、PC(遠隔モ

ニタリングユニット)上で数値をリアルタイムに確認するに十分な解像度と更新速度を備えている。

VNCを用いたMRIコンソールモニタリングにおいて、システムのカラーコードの違いにより一部で色化けが生じているが、操作に影響を与えるものではなくまたMRI画像自体に色化けは生じていないため、臨床運用上問題はないと思われる。

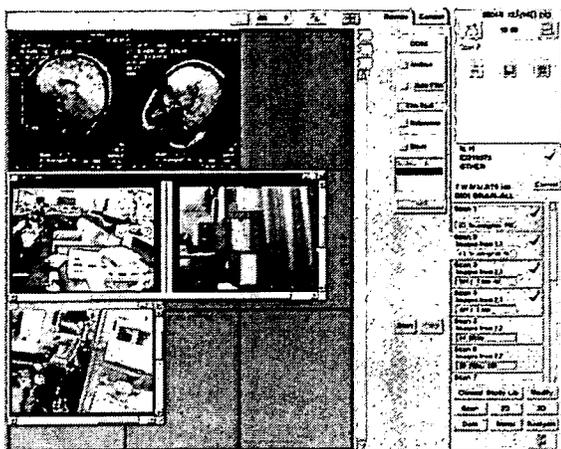


Fig. 16 「手術戦略デスク」での提示画面例。MRIコンソール画面(バックグラウンド)及び術場・研究所(2地点)のカメラ映像がLAN経由で表示される。MRI画面表示では本来黒で表示される文字・バー等が青で表示されている。

臨床での試験運用では、術場内の多角的な情報を得られるため、遠隔地からの手術指導が可能なが示された。遠隔地からの機器制御は術場内人員の最適配置(遠隔で操作できるものに関しては術場外に人員を配置することで、術場内の人員フローの最適化をする)・清潔性の担保に寄与するものと考えられる。

3) 手術マニピュレータの多機能・高機能化

3-1) 多自由度超音波凝固切開マニピュレータの開発・試作

内視鏡下手術を模擬した環境での評価の結果、

従来の装置ではアプローチ困難な角度で臓器にアプローチが可能となり、臨床上の有用性を確認することができた。現在のところインタフェースの開発を行っていないため、医師の思うように自由に操作するというDexterityの面では十分ではない。また、関節の保持剛性の不足により、インタフェース入力時以外に関節角度が外力により変化してしまう問題が認められた。また現状のサイズでは、マニピュレータが屈曲していない状態の場合、振動部のケース(外径φ12)による視野の妨げが認められた。



Fig. 17 豚を用いた多自由度超音波メスの有用性の検討。臨床医による腹腔強化手術(模擬)を通じ有用性の検討を行った。

3-2) OpenMRI対応レーザー手術ロボットシステムの開発

a) 止血システムの開発:

先に述べたように、本システムでは非接触でレーザービームを脳表に照射する。一般に、蒸散目的で非接触レーザー照射を行う場合、蒸散閾値以下までレーザー集光点のパワー密度を下げることで凝固作用に移行できることが知られている。そこで、本検討では、これまで用いてきたコンピュータ制御レーザー照射システムにおいて、レーザーヘッドの位置を蒸散時と比べて5mm遠ざけることでデフォーカス状態にさせた。この時のビームスポット径は約600 μm となり、蒸散能が消失することを摘出ブタ脳で確認した後、以下の実験を行った。

全身麻酔下において開頭したブタ頭部上方にレーザーヘッドを位置決め固定し、パソコン画面上で脳表をモニタしながら太さ0.5mm 前後の露出した血管を選び、画面中央に位置決めした。次いで、その血管を2箇所を横切るような輪郭線の描画パターンを画面上で指定し、レーザー照射プログラムをスタートさせた。

Fig. 18～20 に、CCD カメラで捕らえたレーザー照射領域の映像を示した。Fig. 18 の中央を縦に走行している血管を照射対象とした。Fig. 19 がレーザー照射中の画像であり、パソコン上で指定した描画パターンが映っている。Fig. 20 はそのパターンに沿って2回レーザー照射を実施した後の画像である。レーザーが横切った箇所の血管が部分的に脱血凝固し、血流が無くなっていることが分かる。



Fig. 18 レーザ照射前のブタ脳表面



Fig. 19 レーザ照射時のブタ脳表面



Fig. 20 止血完了時のブタ脳表面

b) 5-ALA腫瘍蛍光同定による選択的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. 21)

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. 22)

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. 23)

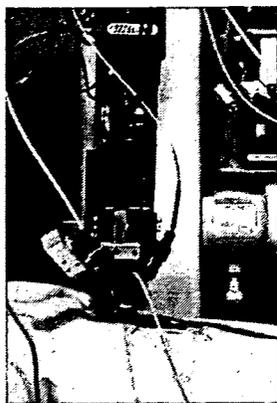


Fig. 21 レーザ手術ロボットシステムヘッド部。励起用レーザーと蛍光測定用ファイバを新たに搭載している。



Fig. 22 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. 23 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。

c) 術中診断情報に基づく手術計画を可能とする診断情報の統合表示システムの開発：

c-1) システムの構築

診断情報誘導下レーザー手術システムの構成をFig. 24に示す。波長 $2.8\mu\text{m}$ マイクロレーザー・CCDカメラ・XY走査ステージ・オートフォーカスユニット等から構成されたレーザーロボットとその制御PC、光学式三次元位置計測装置Polaris Vicra、医療診断画像収集装置であるMRI、そして手術ナビゲーションPCにより構成される。本研究では、誘導方法としてレーザー手術システムのCCDカメラ映像上に、診断画像上で確認される腫瘍位置を重畳表示することとした。

まず術中にOpenMRI等を用いて診断情報を撮影し、画像DICOMデータとして取得したナビゲーションPCにおいて、3D-Slicerを用いたセグメンテーションを行い、腫瘍部位のボリューム画像を得る。ただし診断座標系とレーザー手術システムの座標系は異なるため、腫瘍ボリュームデータの座標系を変換するために座標系統合(レジストレーション)を行う必要がある。レーザー手術システムのロボット操作系の三次元制御の目標精度は $0.50[\text{mm}]$ と定めていることから、診断情報誘導下レーザー手術システムの精度の目標値としてレジストレーション誤差 $0.50[\text{mm}]$ を目指した。

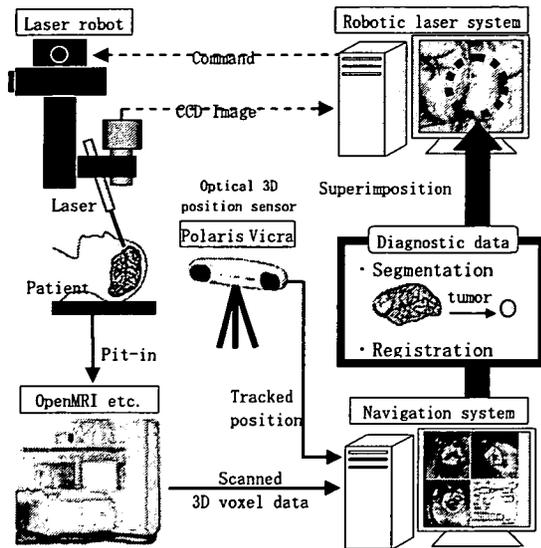


Fig. 24 システム構成

c-2) 座標系統合方法

本システムで統合する座標系について Fig. 25 に示す。レジストレーションではマーカを設置し光学式三次元位置計測装置 Polaris Vicra を用いてマーカ位置を計測する。手術空間のマーカ位置を P_i (マーカ数 $i \geq 3$)、画像座標系のマーカ位置を Q_i としたとき、 $\sum |f(P_i) - Q_i|$ を最小とする写像関数 f を算出する。この rigidbody point-based レジストレーション法により (1) 患者と診断画像のレジストレーション、(2) Polaris Vicra とレーザロボットのキャリブレーションを行なう。そして (1) と (2) の結果から (3) レーザロボットと診断画像のレジストレーション結果である変換行列を算出する。診断情報の腫瘍ボリュームの座標系を変換し、レーザ手術システム画面上に重ね合わせる。

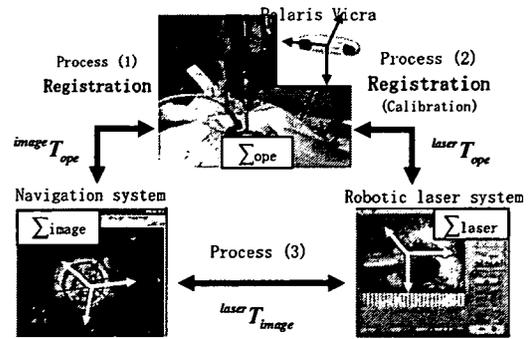


Fig. 25 レジストレーション方法。患者座標系 (Polaris 座標系) を中心に、画像空間座標系、ロボット座標系の統合を行う。

c-3) 結果

レジストレーションした腫瘍座標の平均位置誤差を次式により算出し、その値により精度評価を行った。

$$\text{腫瘍座標の平均位置誤差} = \frac{1}{N} \sum_i |f(P_i) - Q_i|$$

頭部を模擬したファントムに、寒天を用いて腫瘍領域を作成し、実際の手術用マーカを設置したものをを用いてレーザ手術システムとのレジストレーションを行った (Fig. 26)。診断情報として①ファントム製作設計値に基づく理想的な高精細 Volume データ (分解能 0.10mm) と、② OpenMRI により術中と同じ撮影条件であるピクセル間隔 0.90[mm]、スライス厚 1.50[mm] で撮影した MRI データから作成した Volume を用いた。

その結果、①における腫瘍座標の誤差は 0.29 ± 0.04 [mm] となり②における誤差は 1.44 ± 0.31 [mm] となった。②の誤差は Open MRI の画像分解能の粗さによる影響が大きいと考えられることから、システム上では要求精度 0.50[mm] を満たしているといえる。

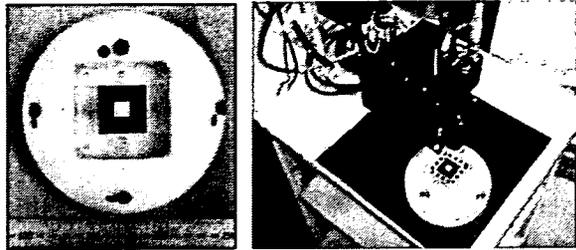


Fig. 26 実験用頭部ファントム。MRI画像マーカポストを4つ備えたφ150mm半球上の頭部モデル内に30mm角シリコンケース(中心黒角部)と擬似腫瘍領域である10mm角寒天ファントム(中心白各部)を備える。

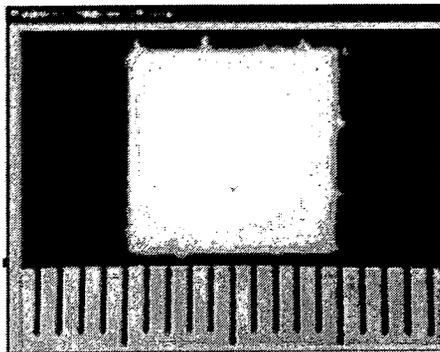


Fig. 27 レーザ手術ロボットシステム指令画面上のファントム内擬似腫瘍領域映像。

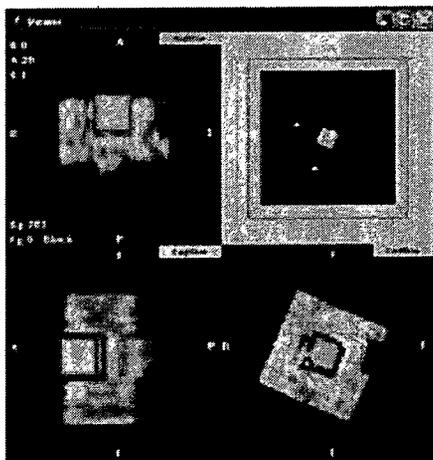


Fig. 28 MRIにより取得した頭部ファントム画像。医用画像ビューア 3D Slicer (<http://www.slicer.org/>)にて表示。3D Slicer 上にて擬似腫瘍領域を抽出しデジタルデータ化する。

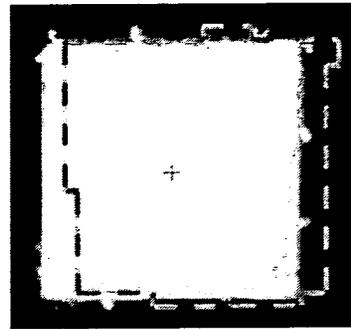


Fig. 29 ファントム・MRIデータ・ロボットのレジストレーションに基づく診断情報統合結果。レーザ手術ロボットシステム指令画面上にMRIデータより作成した擬似腫瘍領域データの輪郭を重畳した。

D. 考察

1) 手術ロボット形状・配置の最適化

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。

本研究では、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。

また、センサ系を多角配置することで死角を低減しロバスト性と精度を向上する目的で、複数カメラを備えたナビゲーションモジュールの開発

を行った。本研究機関内では実装までにとどまり、その効用の定量的評価にまでは至っていないが、今後配置シミュレーションとの連携を実施しながら評価を重ねて生きたい。

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) 医療情報の遠隔モニタリング

今回構築したシステムは、臨床上で使用するに十分な情報の解像度・更新速度を有していた。しかしさらに精緻なモニタリングを行ううえで、更新速度にやや問題が見られた。今回用いたWinVNCの情報送受信速度は主として配信側(遠隔モニタリングユニット側)のPCの性能に左右されることが確認されたので、PCの情報処理・送信性能を向上させることで対応することを考えている。また、ソフトウェア自身の改良・最適化についても検討する。

2-1)では患者側と医師側の1対1通信でかつ1種類の情報(1画面にまとめられた種々のバイタル情報)についての遠隔モニタリングのみについて検討を行ったが、今年度は術前診断画像情報、プランニング情報、ナビゲーション情報などを含む多プロトコル情報をモニタリングかつコントロールできる多次元多地点モニタリングシステムの試作を行った。今年度機器の遠隔地からの制御を可能にしたことは、術場内人員の最適配置(遠隔で操作できるものに関しては可能な限り術場外に人員を配置することで、術場内の人員フローの最適化をする)・清潔性の担保に寄与するものと考えられる。しかし一方で、遠隔では対応できない作業・インシデントに対する処理の問題や、ローカル(術場)とリモート(研究所)双方で操作

が可能な現状では、操作にコンフリクトを生じさせる恐れもあり、運用に関しては手術のワークフローも考慮に入れた新しい指針の検討が必要不可欠と思われる。

今後の課題としては、手術のサポートシステムとして、遠隔モニタ・遠隔PCコントロールの次段階に必要なものは何であるかについて考察を加え、新規研究開発をすすめる。また、「手術戦略」を構築する上で、過去の診断・手術・治療情報データベースとの連携から手術における治療戦略を適宜半自動的に構築するために必要な知的情報システムの構築について今後検討する。

3) 手術マニピュレータの多機能・高機能化

本研究で開発した多自由度超音波凝固切開マニピュレータは、現状世界で唯一の「曲がる超音波メス」である。本マニピュレータの有用性を発揮し、新たな手術ロボットのAdvanced Handとしてシステムに統合することは、安全で効率のよい高機能手術の実現に大いに寄与すると考えられる。試作・実験では、インタフェースの問題・関節剛性の問題・鉗子径の問題が抽出された。今後これらの問題を解決し、低侵襲で安全な手術の確立を目指す。

レーザ手術ロボットシステムにおいては、

- a) 止血システムの開発
 - b) 5-ALA腫瘍蛍光同定による選択的自動治療機能の開発
 - c) 術中診断情報に基づく手術計画を可能とする診断情報の統合表示システムの開発
- を行い、顕微鏡下での単純蒸散を行うシステムから、術中診断に基づくプランニング、スキャンと並行した自動診断とそれに基づく選択的蒸散、出血への対応を備えた高度な治療システムにまで高めた。特に、OpenMRIや5ALA蛍光計測系により得られた3次元デジタルデータを統合し精密な診断・手術計画・治療デバイスを融合した本システムは、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。

しかし一方で、レーザー手術ロボットの精緻な治療能力に対し、診断の精密度が追いついていないのが現状である。本研究ではOpenMRI誘導下脳腫瘍手術における残存脳腫瘍の摘出を、サブミリ以上の分解能・高精度をもつ治療装置により実現し、摘出率の向上と合併症の最小化を目指している。本研究により、レーザー手術ロボットシステムの作業精度と、患者・診断情報・治療装置のレジストレーション精度において目標を達成しているが、診断情報であるMRIや5ALA腫瘍蛍光同定の分解能・精度がこれに追いついていないため、システムの能力を発揮することが困難である。今後の手術ロボットによる精密誘導治療において、精緻な術中診断情報を得ることが非常に需要となると考えられる。

E. 結論

本研究では以下の3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構築についての基礎的検討を行った。OpenMRI手術室の手術機器の3次元データによる、手術ナビゲーション用位置計測装置の配置実験では、シミュレーション結果に基づく配置により認識率の向上が認められ、本システムの有用性が示唆された。

2) Ethernetを介した遠隔患者情報モニタリングシステムの構築を行い、臨床において患者バイタル情報の遠隔モニタリングに成功した。

3) 新たな手術ロボットシステムとして、多自由度超音波凝固切開マニピュレータの開発・試作を行い、動物実験にて問題点の抽出を行った。また術中プランニング・診断・止血機能を備えたOpenMRI誘導下脳腫瘍手術用レーザー手術ロボットシステムの開発を行った。

G. 研究発表

1. 論文発表

伊関洋, 村垣善浩, 中村亮一, 南部恭二郎 :
Intuitive Visualization of medical Information, 日本臨床, 62(4), 607-611, 2004

伊関洋, 村垣善浩, 中村亮一, 西澤幸司, 大森繁, 林基弘, 堀智勝, 高倉公朋, 脳神経外科における Robotic Surgery, 日本外科学会雑誌, 105(12):763-766, 2004

伊関洋, 村垣善浩, 丸山隆志, 中村亮一, 南部恭二郎, 大森繁, 堀智勝, 高倉公朋, 脳神経外科領域の先端医療 インテリジェント手術室, 神経研究の進歩, 48(6):860-866, 2004

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ー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

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

西澤幸司, 村垣善浩, 藤江正克, 佐久間一郎, 伊関洋, 狭隘術野での精密低侵襲手術を支援するマニピュレータシステムの開発, 日本コンピュータ外科学会誌, 9(1):7-14, 2007