

時間分解能に制限がある。そこで、Interventional MRI の領域で主にカテーテルのために提案された手法であるアクティブトラッキング法を応用するための基礎権津を行った。撮像を行うわけではないため、秒間 20 回程度の計測が可能であり、位置計測装置としての利用が十分に可能であると考えられる。位相エンコーディングを行わない手法で計測を行うため位置計測に要する時間が非常に短い。その手順は下記の通りである。

(i) スライス面を選択せず RF パルスを照射し静磁場内の全プロトンを励起する。(ii) X 軸方向に傾斜磁場を印加し、スピンの位相拡散を促す。(iii) X 軸方向の傾斜磁場を反転し、スピンの位相を収束させる。(iv) 収束時に生じるスピンエコーをマイクロコイルで受信する。(v) 受信した信号に一次元フーリエ変換を行い、コイルの位置に相当する周波数ピークを検出し、X 座標を求める。(vi) Y 座標・Z 座標についても同様の操作を行い、コイルの 3 次元位置を求める。

受信コイルは共振回路・整合回路・伝送路・増幅器からなる。共振回路の共振周波数は MRI の静磁場強度によって異なり、実験で用いた MRI (永久磁石型 0.4T オープン MRI 装置 AirisII(Hitachi Medical Co., Kashiwa, Chiba)における、静磁場中心におけるプロトンの歳差運動の角周波数から、共振周波数は 12.8MHz とし試作した。

(2) 軟性臓器におけるナビゲーションに関して、肝臓の力学モデリングとそのシミュレーションへの応用

昨年度までに行った 20 個のブタ肝臓から得られた 70 片の直径 7mm 高さ

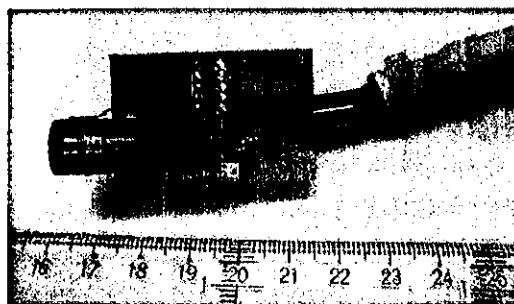


Fig.1 小型コイル外観。12.8MHz の共振回路と出力インピーダンスを 200Ω にする整合回路からなる。

4-11mm の円筒状試験片に対して短軸引張圧縮試験を行った結果をモデル化するために新たな構成式として対数関数と多項式によりひずみエネルギーを表現する構成式を提案した。またこの妥当性を検討するために、提案した構成式を圧子を肝臓組織に押し込むインデンテーション試験の解析に応用し、実験結果に対応した予測が可能であるかを検討した。

術中シミュレーションなど高速な計算が求められる応用分野に適したモデリング手法として、短軸引張圧縮試験で得られた応力-ひずみ関係を Multi-linear model で表現する方法として、短軸で表現された関係を、3次元解析に拡張するために等価応力とひずみを使用する手法を検討した。この方法の有用性を多軸引張圧縮状態である肝臓のインデンテーション実験の解析に応用し検証した。

(3) 腫瘍集積性を有する 5-Aminolevulinic acid(5-ALA)を用いる腫瘍部位の術中計測とロボットへの応用に関する基礎検討

5-Aminolevulinic acid(5-ALA)は脳腫瘍部位に選択的に取り込まれ、代謝を経て蛍

光物質である ProtoporphyrinIX (PpIX) に変化する。この蛍光を発する部位を同定することで腫瘍除去率の向上が期待される。昨年度システムの小型化を目指して蛍光励起光源に半導体レーザー (LD) を採用したシステムを試作した。5ALA による腫瘍の同定と、波長 2.8[μm]の腫瘍蒸散用レーザーによる精密な治療を統合することで、術中の診断に基づいて、精確に腫瘍の除去を行う装置が実現される。このナビゲーション技術と治療技術が一体化したシステムの開発が望まれているが、それには脳表面の正確な位置情報を取得し、位置補正を行うシステムが必要となる。第一段階として、5-ALA による腫瘍同定システムと治療用小型レーザーを組み合わせたシステムの設計と基本要素を試作し、問題点を検討した。

具体的には 5-ALA 計測系の脳表に対する距離を一定に保つことで、一定の条件下での計測を可能とし、同時に治療用レーザーを対象部位に対して正確に焦点を合わせることを可能とするシステムの試作を行った。

試作したシステムでは、ガイドレーザーと計測用小型 CCD カメラを用いた三角測量法により位置計測を行う。システムの概観を Fig.2 に示す。CCD カメラ (東芝社製, IK-UM44H) によって撮影した画像を画像処理ボード (HITACHI 社製, IP5000) により取得し、ガイドレーザースポットの重心座標を算出する。この重心座標から、Z 軸方向の補正量を求め、モーションコントロールボード (Interface 社製, PCI7208) へ指令を送り、直動ステッピングモーター (オリエンタルモーター社製, SPL28T2B-01) を用いた Point to Point (PTP) 駆動により位置補正を行っている。システムの距離分解能は、

0.024[mm]となっている。ガイドレーザーには 532[nm]のレーザーダイオードを用いた。

ガイドレーザーの光軸、及び、CCD カメラの画面の中心軸がそれぞれ蒸散レーザーの焦点位置で交差するように固定されている。よって、対象となる面が焦点位置を通る時は、ガイドレーザーのスポットが CCD カメラの画面上の中心に観察される。対象が焦点位置から離れると、それに従い CCD により観察されるスポットの位置も画面中心よりずれていく。対象面が変化することなく一定であれば、ガイドレーザースポットの画面中心からの変位と、対象面と焦点位置の変位には 1 対 1 の対応関係が成立する。この対応関係を用いて位置補正を行っている。カメラによるスポットの撮影は、照明光や組織による散乱光をカットするため、電子シャッターの速度を上げて行う。本研究で用いるカメラは 1/10000 まで速度を上げることができる。得られた画像を画像処理ボードに取り込み、輝度閾値に関する 2 値化を行う。その後、フィルタリング処理を行い、スポットの抽出を行う。重心座標を算出することによりスポットの位置座標を決定する。本システムの

このガイドレーザーに、5-ALA の代謝物である ProtoporphyrinIX (PpIX) の蛍光励起波長 405nm のレーザーダイオードを使用することで、計測と治療の一体化を図る。

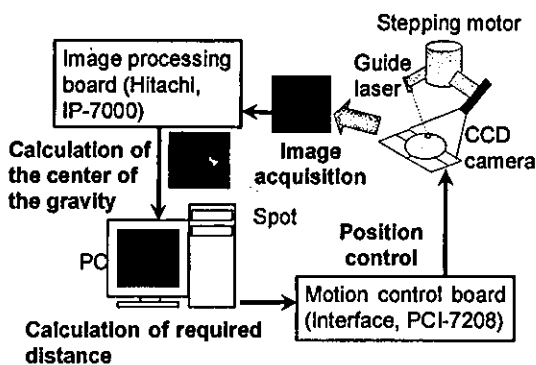


Fig.2 脳表面形状自動追従システム

生体組織に照射された光は、散乱、吸収により減衰し、また組織内部へ透過する。組織によってはスポットの抽出が困難になる、位置座標に誤差を生じるなどの問題がある。そこで、この光学特性がスポットの抽出に及ぼす影響を検討し、スポット抽出のための画像処理パラメタを動的に変更するアルゴリズムを新たに開発し、応用した。特に、2 値化の際の輝度閾値について着目し、動的に変化させる方式を考案し評価を行った。これにより、組織の状態によらず確実にスポット抽出を行い、誤差の少ない安定した計測を目指す。

輝度閾値を動的に変化させる場合と、従来の閾値固定の場合との比較を行った。散乱係数がそれぞれ 30[1/cm], 21[1/cm], 12[1/cm]に調整したイントラリピッドのファントムを並べ、ファントム上を 2[mm/s]の速度で移動させながら位置補正を行った。また試作したシステムも用いて、開頭したブタの脳組織の表面形状追従実験を行い、有効性を評価した。

また、PpIX を混ぜたファントムを作製し、5-ALA の計測と位置補正を組み合わせたシステムにより蛍光の計測を行った。ファ

ントムは 20°]の角度で傾け、装置を移動させながら位置補正と蛍光の計測を同時に行った。これにより表面と計測プローブの距離を一定に維持することによる、5-ALA 誘導蛍光計測の安定性の向上を評価した。

(4) 各種生体計測システム・手術ナビゲーションシステム・手術支援ロボットを対象とした統合プラットフォーム開発における基礎検討、及び実システムを利用した仕様要件の選定

手術支援統合システムの構築においての問題点として、i) 対象とする統合システムに応じて仕様が異なるため、他の統合環境でも再利用が難しい ii) システム間で協調する上でパフォーマンスの干渉が生じる。またそれに伴う干渉回避とシステム間の交換するデータの整合性を保つのが困難である。iii) 接続されるシステムが増加するとシステム全体の Quality of Service(QOS)が保障できなくなる。iv) QOS における手術支援システムにおける要求仕様、及び手術環境下において、手術戦略に応じた各システムでの動的なプライオリティ付けが明確でない。

といった問題がある。

i)の解決方法として、接続するシステムをモジュール単位で扱う技術、分散オブジェクト(Object Request Broker)を利用した統合環境である。ORB として JAVA RUN TIME, COM, CORBA などがあり、その中でも開発する上で位置、言語、機種透過性が最も高いものとして CORBA は様々な研究機関で利用されている。そこでこれまで土肥研究室と共同し、本研究室では腹部外科手術支援マスタスレーブシステムを対

象として、CORBA(ACE+TAO)を利用した拡張性を持たせた分散システム環境の開発を行ってきた。しかしながら、利用するCORBAのサービスに応じてシステム全体の挙動が変化するという問題、また先行研究により、分散環境下で配置するPCのスペック、OSに応じてシステム全体のパフォーマンスが変化するという問題がある。

本研究では、各種生体計測システム、手術ナビゲーションシステム、手術ロボットを対象として再利用可能な統合プラットフォームの開発を目指す。そのため、各種手術支援システムに要求される仕様の選定のためには確実に挙動がわかる条件下かつ臨床に近い環境下での計測が必要である。そのため、本研究では十分に研究され利用されているTCP/IPによる通信をベースとした統合プラットフォームの構築を行い、in vivo環境下での要求仕様の選定を行った。対象とする実システムとして以下の1.2.3を使用した。

1. 手術ロボット:

術者による手では実現が不可能なりアルタイムに対象面との位置補正を行うオートフォーカシングシステム

2. 各種計測システム

術中に正常の脳組織と腫瘍組織をリアルタイムに肉眼的に識別するために5ALA induced PpIXを用いた術中脳腫瘍蛍光診断による腫瘍同定システム

3. ナビゲーションシステム

MRIなどの診断装置と合わせて腫瘍の空間情報を術者に直感的に提示するナビゲーションシステム

システム統合環境では、1,2を統合した前述の(3)で述べた腫瘍集積性を有する

5-Aminolevulinic acid(5-ALA)を用いる腫瘍部位の術中計測とロボットを統合することを行った。

(倫理面への配慮)

動物実験を一部実施したが、実施にあたっては、東京大学動物実験実施規則、東京大学大学院新領域創成科学研究科動物実験委員会規則を遵守し、適切に実施した。工学的研究が本年度も主であることから臨床研究は実施していない。

C. 結果

(1) ロボット搭載型MRIコイルによるアクティブ位置同定手法の検討

作成したコイルがMRIで使用可能か確認するために、MRIの受信機に接続し、通常の撮像を行った。水の入ったボトル表面にコイルを貼り付け、スピンエコー法で撮像した。小型コイルが感度を有すると考えられる限られた領域の描画ができていることから、局所に感度を有する受信コイルとして機能していることが確認された。

(2) 軟性臓器におけるナビゲーションに関して、肝臓の力学モデリングとそのシミュレーションへの応用

次式に示す新たな構成式として対数関数と多項式によりひずみエネルギーを表現する構成式を提案した。

$$W = \frac{-C_1}{2} \ln(1 - C_2(I_1 - 3)) + \left(\frac{C_3}{2} - \frac{C_1 C_2}{2}\right)(I_1 - 3) \quad \dots (2.1)$$

$$I_1 = \lambda^2 + 2/\lambda \quad \dots (2.2)$$

$$\Delta L = L_0(\lambda - 1) \quad \dots (2.3)$$

ただし、 L_0 , ΔL はそれぞれ試験片の自然長、と伸縮量である。

公称応力 $T = \frac{F}{A_0}$ は (F, A_0 はそれぞれ試験片に加わる力と試験片の断面積)

$$T = \frac{2}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial I_1} \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) + \frac{2}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial I_2} \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad \dots (2.4)$$

として与えられる。

実験的に計測されたポアソン比は0.5程度であり、非圧縮性を仮定した。ブタ肝臓組織は超弾性体とみなすことが可能であった。

提案したひずみエネルギー関数は圧縮引張の全区間にわたり実験結果をよく再現することができ、モデルと実験値の2乗平均誤差は、 91.92 ± 17.43 Pa, 57.55 ± 13.23 Pa, 29.78 ± 17.67 Pa程度であり、軟性臓器の非線形的な機械特性をよく表現することができた。ひずみの小さな領域では対数関数の成分が小さく、多項式の成分が優位となり、ひずみが大きい領域ではその役割が逆転する。従来報告された、Mooney Rivlin モデルは9つのパラメタを持ち、提案した構成式より実験結果をよりよく再現できるが、提案した構成式が3つのパラメタのみで変形特性を記述できることから、計算効率の観点では優れている。また、異なる実験結果を記述する場合にMooney Rivlin モデルではパラメタの符号が変わることが見られたが、これは有限要素解析の安定性に関して問題となる。一方提案した構成式ではこのようなことはなかった。したがって提案した構成式は、少ないパラメタで肝臓の非線形的な変形特性を表現できる、数値的に安定なモデルであると考えられた。

提案した構成式を、圧子を肝臓組織に押

し込むインデンテーション試験の解析に応用し、十分な実験結果に対応した予測が可能であることを確認した。

また、計算を高速化するために短軸引張圧縮試験で得られた応力-ひずみ関係を Multi-linear model で表現する方法として、短軸で表現された関係を、等価応力とひずみを使用して3次元解析に拡張し、有限要素解析に応用した。肝臓試験片のインデンテーション試験の実測結果(Fig.4)と予測結果を重ね合わせたものを Fig.5 に示す。

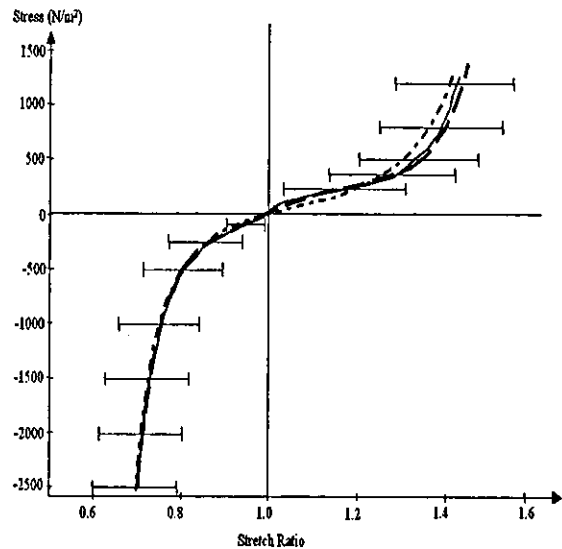


Fig. 3 肝臓試験片の引張り圧縮試験結果と理論予測との比較、実線は実験値の平均値を示す。あわせて実験値の標準偏差を示す。点線がMooney-Rivlin (9-constant)モデル、一点鎖線が提案するモデルによる予測である。

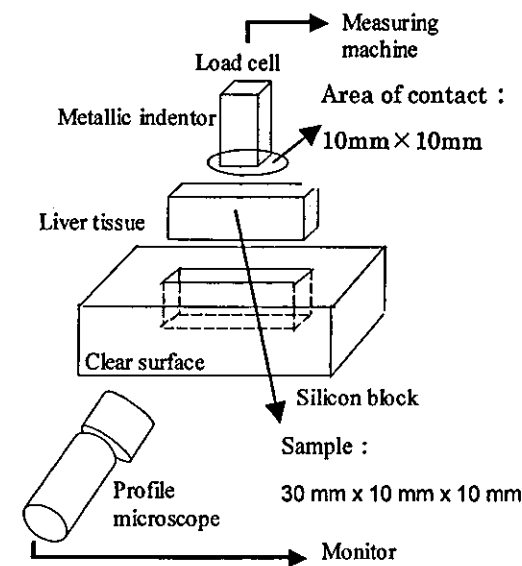


Fig.4 肝臓試験片の押し込み実験系

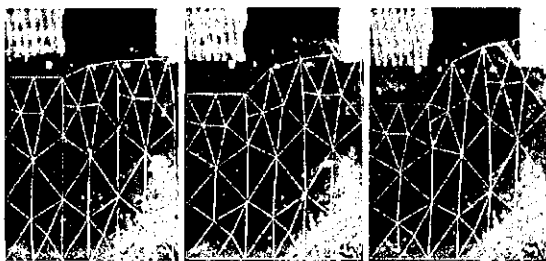


Fig.5 肝臓押し込み試験結果と有限要素モデルによる推定結果

(3) 腫瘍集積性を有する 5-Aminolevulinic acid(5-ALA) を用いる腫瘍部位の術中計測とロボットへの応用に関する基礎検討

輝度閾値を動的に変化させる場合と、従来の閾値固定の場合との比較を行った。

Fig.6 に示すように、特に 30[1/cm] のファントムにおいて、閾値を動的に変化させることで誤差の低減が図られた。また、閾値を動的に変化させた場合の方が、取得したスポット面積のばらつきが小さく、誤差の小さい安定した計測が行われていたと考えられる。

麻酔下に開頭したブタの脳組織を対象と

した、In vivo 動作実験を行った。閾値を固定で行った場合は、スポットの取得率が 30%であったのに対し、動的に変化させることで、スポットのロストがなくなった。閾値動的に変化させた場合の方が、取得したスポットの面積のばらつきが小さかった。

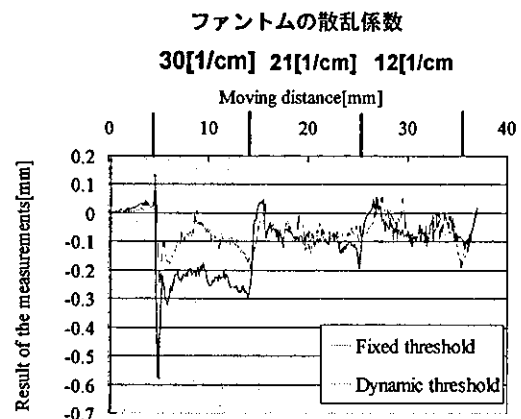


Fig.6 異なる散乱係数の組織ファントムに対する位置追従結果

5-ALA 誘導蛍光計測系との統合実験では、蛍光計測プローブと、ファントムとの位置補正を行い、対象との距離を一定に保った場合と、位置補正を行わず対象との距離が次第に離れていく場合の計測を比較した。位置補正を行った場合は、計測される蛍光の強度が一定であったのに対し、補正を行わなかった場合は対象との距離が離れるほど計測される蛍光の強度が弱まった。5-ALA による術中腫瘍同定と、対象への自動位置補正を組み合わせることで、より定量的な脳腫瘍計測が可能になると考えられる。

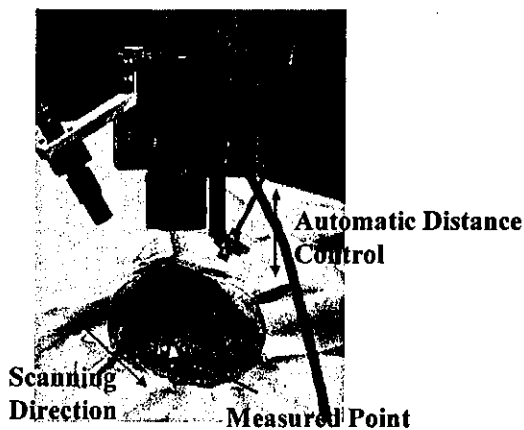


Fig. 7 ブタ脳表面形状追従実験

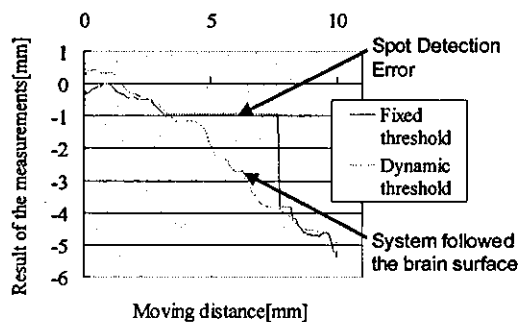


Fig.8 追従結果

(4) 各種生体計測システム・手術ナビゲーションシステム・手術支援ロボットを接続するための統合システムの試作

手術支援統合プラットフォームは Fig.9 に示すように、PpIXによる腫瘍の検出を行う脳腫瘍計測システム(Fig.10), 各種手術装置の位置情報を取りまとめ座標系の統合を行う3次元位置計測装置, それらの情報を取りまとめ管理する情報統合システム, そして術者に視覚的な提示を行うナビゲーションシステムとの連動により行われる。B 研究方法。(4)で述べたように, 統合プラットフォームの開発における問題点 ii)として, パフォーマンスの干渉回避とシステム間の交換するデータの整合性を保つのが困難という問題への解決手法として, 情報

を取りまとめる情報統合システムに対し, 非同期かつ QOS 保証下での周期実行機能を付加し, 解決を試みた。この手法を今後展開する CORBA を利用し実験したところ, Fig.11 のような結果が得られ, 干渉を回避しながらも周期 30[msec]以上であるならば同期通信に近いパフォーマンスが得られることを確認した。

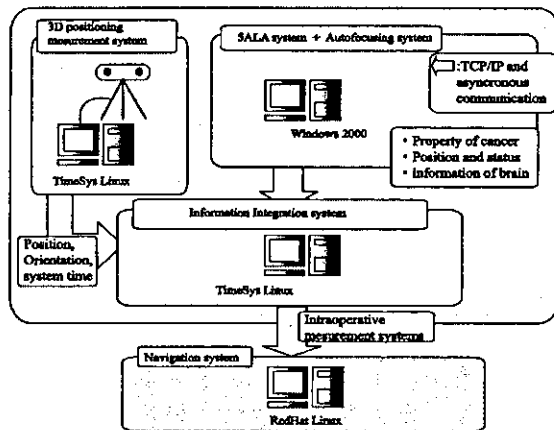


Fig.9 情報統合プラットフォームにおけるシステム構成

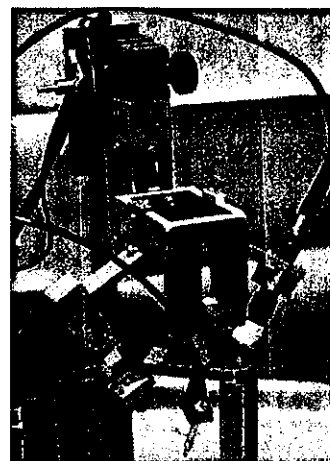


Fig.10 5ALA による局所腫瘍検出デバイスを搭載した脳腫瘍スキャンニングシステム

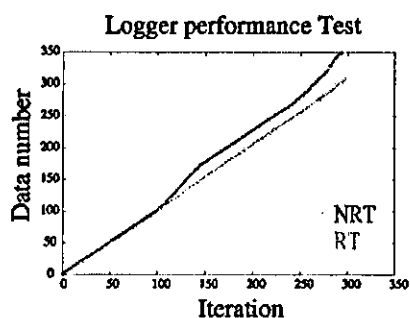


Fig.11 予備実験による情報統合システムの評価結果 (NRT:機能あり, RT:機能なし) 機能を付加することで同期通信に近い安定したデータ交換が可能であった。

D. 考察

ロボット搭載型 MRI コイルによるアクティブ位置同定手法の検討に関しては、今回試作したコイルにより、位置計測が可能であることが確認できた。位置計測に必要な MRI 制御のための専用制御ソフトウェアの試作を今後行う予定である。また、ロボットの位置、特に作業を行う先端部分の位置・姿勢を複数の点で行うためにはロボットと先端近傍に複数のコイルを設置する。軟性臓器におけるナビゲーションに関して、肝臓の力学モデリングとそのシミュレーションへの応用に関しては、術中シミュレーションなど高速な計算が求められる応用分野に適したモデリング手法として、短軸引張圧縮試験で得られた応力-ひずみ関係を Multi-linear model で表現する方法を検討した。肝臓組織が等方性であると仮定し、提案したひずみエネルギー関数を円筒状の圧子を肝臓組織に押し込むインデンテーション試験による組織変形の解析に応用した。押し込み子の先端に加わる力を計測し、これがモデルから理論的に予測される値と一致するかを、ひずみ速度を通常の外科的処

置で想定される範囲に設定し検討し、良好な結果を得た。ただし押し込み速度が大きい場合に実験で観測された低ひずみ領域での応力の振動的な変化を表すことはできなかった。これは粘弾性の影響によるものと考えられる。

現在、研究成果を統合した肝臓治療のシミュレーションシステムとして、近年肝臓がんの低侵襲治療法であるラジオ波焼灼術 (RF Ablation) の手術シミュレーターの開発を行っており、焼灼針の挿入経路のシミュレーションでは、本論文で検討した応力-ひずみ関係の Multi-linear model を用いた臓器変形ならびに針のたわみの推定などにも発展させることができるものと考えられる。

腫瘍集積性を有する 5-Aminolevulinic acid (5-ALA) を用いる腫瘍部位の術中計測とロボットへの応用に関する基礎検討では、大脳皮質、血管、血液など異なる光学特性を持つ組織が混在する条件の下でも、様々に変化する脳表面形状に追従して、計測用プローブあるいは治療用レーザを精確に表面形状に沿って移動させる手法を開発した。組織に照射した蛍光励起光源などの光スポットを画像処理することを基本とする手法であるが、画像処理の輝度閾値固定では、組織の透過性・散乱性の変動の影響を受けやすく、スポットを抽出できないという問題があったが、本研究で提案した輝度閾値制御の方法で、実際の脳表に対しても、安定したスポット取得が可能になることが示された。

また、呼吸性移動、動脈の拍動などにも追従させるためには高速度カメラの導入による高速化や、心電図などの他のバイタル

サインを応用した同期制御などを検討する必要がある。

本手法は5-ALA誘導蛍光を使用した術中の脳腫瘍部位計測との親和性が良いため、5-ALAによる腫瘍同定システムと治療用小型レーザを組み合わせた診断・治療を一体化したシステム実現のための基本技術になりうると考えられる。

各種生体計測システム・手術ナビゲーションシステム・手術支援ロボットを対象とする統合プラットフォームの設計および開発における基礎検討においては、システム間のパフォーマンスの干渉回避において、システム間で交換するデータの整合性を保つ非同期かつ QOS 保証下での周期実行機能を付加した情報統合システムの開発を行った。この手法を用いることにより、今後展開していく CORBA 環境でも有効に利用可能であった。そのため、統合プラットフォームの開発においての問題解決の基本的な手法として役立つと考えられる。

腫瘍スキニングシステムの機能である位置補正と組み合わせた計測により、5ALAによる計測の感度を一定に保ちスキニングすることによる再現性があり、かつ定量的な腫瘍同定が可能であった。

E. 結論

本年度は柔軟なロボットのMRI下でのナビゲーションを行うための基礎技術である、ロボット用アクティブトラッキング手法の検討、軟性臓器を対象としたナビゲーションの基礎となる臓器の変形モデリングのための臓器の力学特性の構成式の提案、治療と診断の一体化システムの例としての5-ALA誘導蛍光計測とレーザ蒸散システム

の統合のための組織表明形状へのレーザ・計測プローブの追従機構を試作した。また各種生体計測システム・手術ナビゲーションシステム・手術支援ロボットを接続するための統合プラットフォームで問題となるパフォーマンスの干渉問題の解決するシステムの試作を行った。また、統合プラットフォームの開発に求められる実システム適用下での仕様要件の選定および試作したシステムの有効性を確認した。

G. 研究発表

1. 研究論文

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 6:2005 (印刷中)

② C.Chui, E.Kobayashi, X.Chen, T.Hisada, I.Sakuma: Combined compression and elongation experiments and non-linear modeling of liver tissue for surgical simulation, Medical & Biological Engineering & computing, 42:787-798, 2004

③ Shigeru Omori, Yoshihiro Muragaki, Ichiro Sakuma, Hiroshi Iseki: Robotic Laser Surgery with $\lambda = 2.8 \mu\text{m}$ Microlaser in Neurosurgery, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.16 No.2, 2004

2. 学会発表

① E.Aoki, T.Suzuki, E.Kobayashi, N.Hata, T.Dohi, M.Hashizume and I.Sakuma: 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, pp.184-191, 2004
- ② Takashi Maruyama, Yoshihiro Muragaki, Masahiko Tanaka, Hiroshi Iseki, Ichiro Sakuma, Tomokatu Hori, Kintomo Takakura: Efficacy of 5-aminolevulinic acid-induced fluorescence detection in malignant glioma surgery, Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2004), Chicago, pp.1290., 2004
- ③ 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
- ④ 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
- ⑤ 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
- ⑥ 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：脳外科用レーザー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
- ⑦ 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
- H. 知的財産の出願・登録情報(予定を含む)
 蛍光生体計測と手術ナビゲーションの統合手法(特許出願予定)

MRI 下低侵襲手術のための臓器モデリングと多自由度マニピュレータ

分担研究者 藤江 正克 早稲田大学理工学部機械工学科 教授

研究要旨. Open-MRI を用いた手術では、その作業空間の狭さから、ロボットを用いた遠隔手術のメリットが大きいと考えられる。しかし、従来の手術ロボットはロボット自体が大きく、かつ自由度も低いため、狭い手術空間での複雑な作業には適さない。また、ロボットを用いた手術では、臓器の力学的変形を定量化することが、精密な手術を行う上でのキーポイントとなる。そこで、本研究では、軟組織を対象としたモデリングの検討と MRI での駆動が可能な多自由度マニピュレータの開発を行った。モデリングでは、肺を対象とし、肺の虚脱状態を再現することに成功した。マニピュレータは、可撓性を有する磁場駆動型マニピュレータと、ワイヤ駆動の微細マニピュレータを開発した。これらの結果をふまえ、今後は臨床にむけたさらなる統合システム開発を推進していく。

A. 研究目的

肺や胎児のような軟組織を対象とした手術に対して、Open MRI 下の低侵襲手術が提案されている。Open MRI を使用すれば、患部をリアルタイムで観察しながら治療を行うことができるメリットがある。一方で、軟組織を対象とした手術は臓器変形が大きく精度が低下するという問題がある。また、手術ロボットを導入する場合は、OpenMRI 内の作業空間が狭いことが課題として挙げられる。

そこで本研究では、OpenMRI 下で、より低侵襲かつ正確に手術を行うための工学的支援を行うことを目的とする。まず、肺を対象としたモデリングを行い、手術用ロボット開発のための基礎的なデータを得た。また、MRI の磁場内で駆動可能な多自由度マニピュレータを 2 種類開発した。

B. 研究方法

B.1 肺の臓器変形モデル作成

肺の手術では、術前画像として X 線 CT を用いることが多い。このとき、息を吸った状態、つまり肺が大きく膨らんでいる状態で撮像される。しかし、実際の手術では、肺の空気を抜いて虚脱状態にして組織の切断や縫合を行う。肺が虚脱状態になった時、術前 CT 画像の腫瘍の位置は大きく移動してしまう。現在は、術前に CT 下で腫瘍周辺にマーカーをつける手法を取っているが、放射線被曝は避けられない。そこで、肺の膨張状態から虚脱状態に変化する過程をモデリングし、虚脱状態での腫瘍位置を特定する方法を開発した。

まず、ブタの肺組織に対して、粘弾性測定を行い、肺の組織特性を求めた。次に、人間の肺の CT 撮像画像から肺の外形を抽出し、有限要素シミュレーターにより肺の 3D モデルを構築した。今後は、このモデルを用いて、虚脱状態を CG 上で再現することが可能となる。

B.2 MRI 対応多自由度マニピュレータ 磁場駆動型マニピュレータ

気管支などの複雑な組織内での生検や治療を目的として、磁場で駆動するチューブ型のマニピュレータを開発した。昨年度の 1 自由度に対して、本年度は、2 自由度と自由度を増やし、複雑に入り組んだ気管支の中を挿入可能な構成とした。原理は、マニピュレータに巻きつけたコイルに電流を与え、磁場から受けるモーメントにより駆動する。外径は 4mm であり、気管支の基幹部分の径に対しては十分小さいといえる。また、本年度は、コイルとチューブ間の接合部材を工夫し、機構的強度を増すとともに、漏電対策も実施した。

ワイヤ駆動型マニピュレータ

ワイヤ駆動型の微細マニピュレータを開発した。このマニピュレータは、直径 2.4mm、曲げ半径 2.45mm であり、ボールジョイントを 4 本のワイヤで駆動することにより、任意の角度への屈曲を行う。マニピュレータの構成部材には非磁性材料を、アクチュエータには超音波を用いることで、MRI 内での駆動を視野にいれた設計とした。このマニピュレータは大変微細であり、かつ剛性が高いため、胎児手術だけでなく、肺、前立腺、肝臓、脳など、他の分野への応用が可能である。

(倫理面への配慮)

上記の研究方法 B 1 にて用いたブタの組織は業者にて適正に処理されたものを購入しており、倫理面での問題はない。B 2 においては、工学的検討のみであり、生体は使用していない。以上により、本書の範囲では倫理面での問題はない。

C. 研究結果

C.1 肺の臓器モデリング実験結果

ブタ肺の組織を用いて、静的・動的的特性試験結果

を実施し、肺の特性データを計測した。また、人間の肺のCT画像をセグメンテーションし、肺を実質と気管支に分けて、モデル化した。これにより、肺の3Dモデルを構築することができた。

C.2 MRI対応多自由度マニピュレータ実験結果

磁場駆動型マニピュレータ

2自由度それぞれについて、磁場を用いた駆動を確認した。また、コイルとチューブの接合部の設計を変更したことにより、Nの力を加えても、チューブが外れないことを確認した。

ワイヤ駆動型マニピュレータ

4本のワイヤにより、4関節のマニピュレータを駆動し、任意の角度に180度の回転を行うことができた。

D.考察

D.1 肺の臓器モデリング実験結果

開発した手法により、吸気時の肺のモデルを完成させた。しかし、虚脱状況を再現するためには、内圧と体積歪みの関係を定量的に求めることが課題である。

D.2 MRI対応多自由度マニピュレータ実験結果

スムーズな駆動を確認することができたが、今後は、正確な位置決めのための制御方法の開発が必要である。

E.結論

特に肺や胎児などの軟組織を対象として、MRI下低侵襲手術のための臓器モデリングと多自由度マニピュレータを開発した。これらの結果をもとに、今後は、統合的なシステムを開発し、早期臨床適用を目指す。

F.健康危険情報

特になし

G.研究発表

1.論文発表

なし

2.学会発表

1. 元吉正樹, 岡本淳, 藤江正克, “磁力駆動手術マニピュレータの開発”, 日本機械学会[No.04-4] ロボティクス・メカトロニクス講演会’04 講演論文集, 2P2-H-54, 2004-6
2. 原田香奈子, 坪内広太, 千葉敏雄, 藤江正克; Open-MRI 下における低侵襲胎児手術用マニピュレータの開発、第13回日本コンピュータ外科学会論文集, pp.111-112, 2004-12
3. Kanako Harada, Kota Tsubouchi, Toshio Chiba, Masakatsu G. Fujie; Manipulators for intrauterine fetal surgery in an Open MRI, ICRA 2005 IEEE International Conference on Robotics and

Automation (Being Published)

4. Kanako Harada, Kota Tsubouchi, Toshio Chiba, Masakatsu G. Fujie; Manipulators for intrauterine fetal surgery in an Open MRI –Report on first prototype–, CARS 2005 Computer Assisted Radiology and Surgery (Being Published)
5. 原田香奈子, 岩瀬健太郎, 坪内広太, 千葉敏雄, 岸宏亮, 藤江正克; Open MRI 下胎児手術支援システムの開発 (第一報) –微細マニピュレータと鉗子ナビゲーション–, ロボティクス・メカトロニクス講演会’06 講演論文集 (CD-ROM) 2005-6 (掲載予定)

厚生労働科学研究費補助金(身体運動解析・補助・代替機器開発研究事業)
(分担)研究報告書

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ロボットの形状・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)ネットワークを介した術中情報遠隔モニタリングシステムの2次試作と臨床での検討、3)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、4)新しい手術ナビゲーションシステムの構築のために、複数代設置可能な光学式3次元位置計測装置の応用可能性の検討を行った。

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。

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。

4) MRI手術室での新しいナビゲーションシステムの開発

現在のナビゲーションシステムに存在する、認識領域の狭さ、死角、精度の問題を解決することが必要である。

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

-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-

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。

使用したソフトウェアは以下のとおり。

a) Autodesk 社製 Autodesk Inventor Professional

機械設計用3次元CADソフトウェア。手術機器の3次元外形データの作成を行う。

b) Mathworks社製 Matlab

多機能数学ソフトウェア。機器の4次元(3次元+時間軸)的動作アルゴリズムの作成を行う。

c) MSC Software社製 isual Nastran 4D

汎用機構・構造解析ソフトウェア。a)で作成した外形データとb)で作成した動作アルゴリズムを用いて動作解析を行い、機器の干渉等について考察を行う。

2) 手術戦略デスクの開発

-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-

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。昨年度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「どこでも入院ユニット」を開発・試作し、臨床での検討を行った。今年度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昨年度と同様、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。図に遠隔モニタリングのシステム概略を示す。

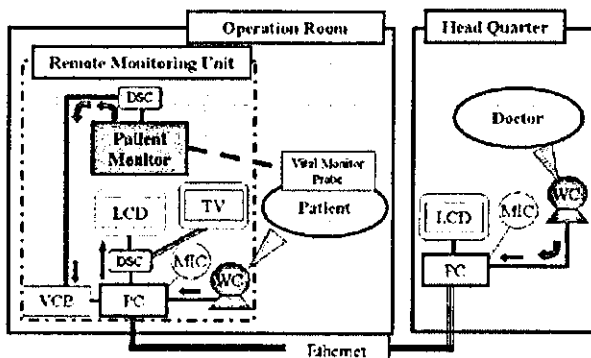


Fig.1 遠隔モニタリングシステム構成図

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サンプリングコンバータ (DSC) ビデオキャプチャボード (VCE) 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、悪性神経腫瘍摘出術において、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

-OpenMRI対応レーザ手術ロボットシステムの開発・試作-

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 μ 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。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。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

固止血には困難が伴い、血液成分にレーザ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。

今年度本研究では、本レーザシステムを用いた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。



Fig.2 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：今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。

4) MRI手術室での新しいナビゲーションシステムの開発

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脳外科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、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Northern Digital Inc社製 POLARIS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・性能向上に関する研究を行った。

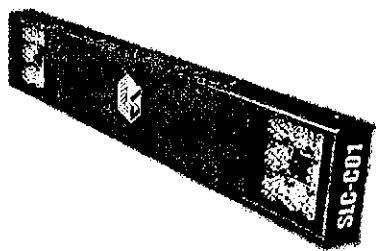


Fig. 3 ステレオラベリングカメラモジュール(サイヴァース社製)

以上、本年度は1)～4)についての検討を行った。

(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：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

-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-

本年度は先に示した3つのソフトウェアの設定・調整を検討し、

- ・手術場機器の3次元形状測定を行い、データの構築を行った。
- ・今後手術中の機器の移動の様子を元に移動データを作成し、機器の干渉・術者/助手との干渉について考察を行う
- ・来年度以降、機器配置の検討をベースに、手術ロボットの形状・配置の最適化について検討することを目指す。

また本年度より術場内の映像獲得用に多数のCCDカメラを術場内に設置したので、これらの視野角(映像取得領域)をモデル化し本システムに統合することで、死角のないカメラは位置についての検討も行っていくことを考えている。

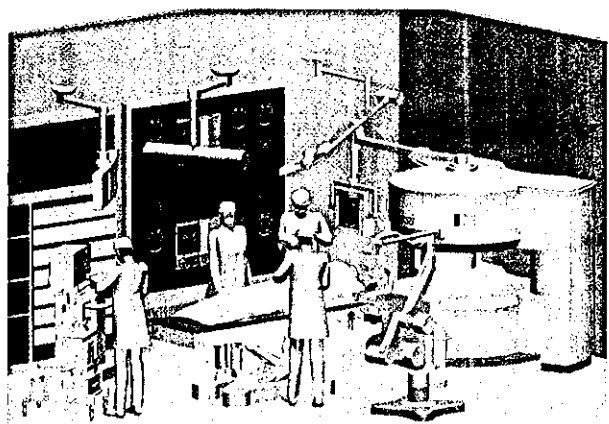


Fig. 4 OpenMRI手術室内機器・人員の3Dデジタルデータ化

2) 医療情報の遠隔モニタリング

-Ethernetを介した遠隔患者情報モニタリングシステム「手術戦略デスク」の構築-
今年度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. 5に示す。



Fig.5 遠隔モニタリング・操作制御システム「手術戦略デスク」。中央の大画面で術花胃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。

昨年度の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チャンネルに増やし、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、昨年度行った「どこでも入院ユニット」での臨床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。

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2~5fps程度とやや遅いため、波形の経時的な観察にはやや問題を有している。

VNCを用いての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。

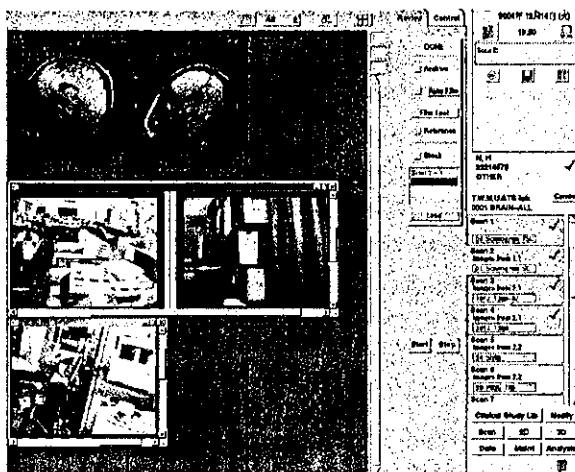


Fig.6 手術戦略デスク」での提示画面例。MRIコンソール画面(バックグラウンド)及び術場・研究所(2地点)のカメラ映像がLAN経由で表示される。MRI画面表示では本来黒で表示される文字・バー等が青で表示されている。

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 -OpenMRI対応レーザー手術ロボットシステムの開発・試作-

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 μ m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.7~9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.1の中央を縦に走行している血管を照射対象とした。Fig.2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. 3 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。レーザービーム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. 7 レーザ照射前のブタ脳表面



Fig. 8 レーザ照射時のブタ脳表面



Fig. 9 止血完了時のブタ脳表面

4) MRI手術室での新しいナビゲーションシステムの開発

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。

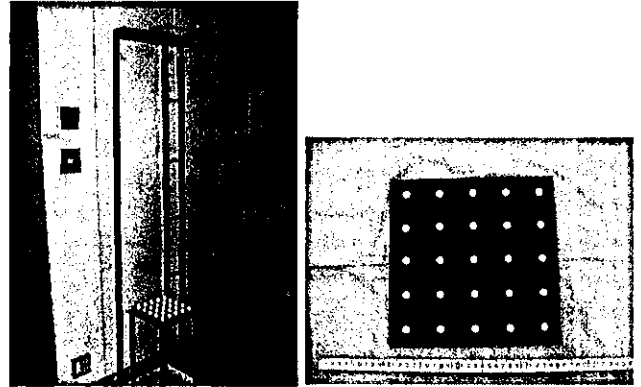


Fig. 10 SLC精度検証装置。右：精度測定版。反射球マーカを50mm感覚で設置。左：設置全体図。下に精度測定版、上部にSLCを設置し、相対距離を変化させながら精度の測定を行った。

Table. 1 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

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やDigital Volume Tomography (DVT)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。

今後の研究計画として、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

-Ethernetを介した遠隔患者情報モニタリングシステムの構築-

今回構築したシステムは、臨床上で使用するため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。

昨年度の研究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。

来年度以降の課題としては、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。

3) 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-

今年度新たに試作した装置を用いて、レーザービームスポットをデフォーカスさせることに

より、蒸散エッチング領域に存在する血管を予め凝固止血できる可能性が確認できた。レーザー照射領域は常に画面上でモニター可能であるため、事前の止血と続くプロセスでの蒸散位置の指定は容易に行える。

今後は、止血可能な最大血管径の見極めと、血管止血を行った後の脳表領域において、出血無く蒸散エッチングが進められることを実証していく。

4) MRI手術室での新しいナビゲーションシステムの開発

今回の精度測定実験の結果、SLCは精度上ナビゲーションシステムの位置計測システムとして応用するには改良が必要なことが明らかとなった。

精度向上のための方策としてはまず、計測値を補正するためキャリブレーションする必要がある。また主な計測誤差の原因はレンズの歪みであり、SLCに工場出荷状態でかけられている補正では、ナビゲーションで必要とする精度まで補正が充分になされていないことも分かった。SLCは小型・軽量で扱いやすく、複数代設置も可能であるため臨床上有用であることは明らかであるが、今後はSLC筐体自身の改良についても検討していく必要がある。

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構築についての基礎的検討を行い、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) 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、臨床において術場情報・患者バイタル情報の遠隔モニタリングのみならず、手術場PC機器の遠隔操作に成功した。今後は基本性能の向上(スループットなど)、総合的な手術サポートシステムとしての新機能の開発を通じ、手術戦略支援システムとしての高機能化を図る。
- 3) OpenMRI対応レーザー手術ロボットシステムの構築のために、出血をコントロー

ルする止血モードレーザー照射機能を新たに開発し、Invivo実験にてその有用性を確認した。

- 4) OpenMRI手術室のための新たなナビゲーションシステムの構築のために、複数代設置可能な3次元位置計測装置の応用化脳生を検討した結果、精度上大きな問題が存在することがわかった。

F. 健康危険情報
なし

G. 研究発表

1. 論文発表

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

2. 学会発表

Shigeru Omori, Ryoichi Nakamura, Yoshihiro Muragaki, Hiroshi Iseki, Computer controlled Mid-infrared Laser Surgery System in Neurosurgery, the 5th Congress of Asian Society of Stereotactic Functional and Computer Assisted Neurosurgery, p84, Kaohsiung, Taiwan, November 27-30, 2004

Shigeru Omori, Ryoichi Nakamura, Yoshihiro Muragaki, Ichiro Sakuma, Katsuhiro Miura, Masao Doi, Hiroshi Iseki, Mid-IR Robotic Laser Surgery System in Neurosurgery, The 1st International Conference on Complex Medical Engineering-CME2005, Takamatsu, Japan, May 15-18, 2005(accepted)

中村亮一、林基弘、伊関洋、荒俣博、藤田吉之、南部恭二郎、村垣善浩、堀智勝、高倉公朋、小児全身麻酔下ガンマナイフ治療におけるNetwork-based遠隔モニタリングシステム、第63回日本脳神経外科学会総会、名古屋、10月6~8日、2004

荒俣博、中村亮一、南部恭二郎、林基弘、村

垣善浩、長田理、鎌田ことえ、伊関洋、堀智勝、高倉公朋、ガンマナイフモデルC導入に伴う治療および患者管理に対する情報技術誘導による医療安全管理システムの構築、第13回日本コンピュータ外科学会大会、東京、12月10-12日、p135-136、2004

大森繁、中村亮一、村垣義浩、伊関洋、高倉公朋、コンピュータ制御による脳外科用中赤外レーザーの機能開発、第13回日本コンピュータ外科学会大会、東京、12月10-12日、p37-38、2004

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

新たな手術用ロボット装置の開発 に関する研究
「ロボット手術装置の評価」

分担研究者 橋爪 誠 九州大学大学院医学研究院災害・救急医学 教授

研究要旨

消化器内視鏡による治療手技、例えば早期胃癌に対する内視鏡的粘膜切除術(EMR)は治療手技として確立しており、合併症や長期治療成績も明らかにされつつある。しかしながら本手技は医師が軟性内視鏡の画像を見ながら鉗子孔を通過しうる器具のみを用いて視野や操作性に制限の多い手技である。そこで本研究では従来の内視鏡に応用しうるロボット鉗子ではなくロボットに従来の内視鏡の機能を実装するという発想転換のもとに、内視鏡画像のみならず CT、MRI、超音波などの複数の画像のデータを統合活用でき、正確で多機能な鉗子機能を備えた内視鏡型ロボット装置を開発する。分担研究では、ロボットのインターフェースの最適化を目的として、欧米で既に市販されて臨床導入されている、マスタースレーブ型手術ロボットの操作性の評価を行った。結果、単に医師の操作をロボットに伝達させるのではなく、手指振戦の除去機能や、座標系の伝達の工夫、ロボットの操作性が大きく異なることが明らかとなった。

A. 研究目的

本研究の目的は、光学機器に頼らない複数の診断モダリティを有機的に活用した画像誘導機能を備え、超小型マニピュレーション部により早期癌の局所診断治療を可能とする新しい内視鏡型ロボット装置を開発することである。分担研究では、ロボットのマンマシンインターフェースの最適化や実装するソフトウェアの機能を明らかにする目的にて、欧米で既に市販されて臨床導入されている、マスタースレーブ型手術ロボットの操作性の評価を行う。

B. 研究方法

以下の研究テーマ別に研究を推進する。

テーマ 1: 既存のロボットシステムの操作性に関する検討。

マスタースレーブ型手術支援ロボット da Vinci と ZEUS による幽門側胃切除術を臨床的に比較し、操作性に与えるインターフェイス、マスタースレーブ間の制御の影響を検討する。
テーマ 2: da Vinci システムのマイクロサージェリにおける有用性の検討。

da Vinci は、外科医の手指の動きをほぼ完全に再現する自由度をもつばかりではなく、

手指の生理的振戦を除去する機能、操作の微細さに応じて、動作の大きさの伝達比率を変える機能(Motion Scaling 機能)をソフトウェアにて付加されている。これがマイクロサージェリなどの繊細な手術に与える効果を検討する。

本年度は ZEUS 胃切除術 4 例を施行し、da Vinci と ZEUS の情報伝達の違いが操作性に与える影響について検討した。また、da Vinci のマイクロサージェリにおける有用性を、ラットを用いた動物実験にて通常の顕微鏡下手術と比較検討した。

(倫理面への配慮)

本研究での個人情報には厳重な管理を行い、研究結果発表の場合に特定個人が認識されないよう配慮を行う。先端医療機器の臨床応用に際しては本学倫理委員会と患者の同意を得て遂行する。

C. 結果

da Vinci、ZEUS による検討の結果、狭小な作業領域下で、縫合結紮という複雑な手術操作を、ストレス無く安全に行うためには、ロボットに 7 自由度の鉗子先端動作が必要で、