

図6 水平面屈曲機構における応答特性.
Fig. 6 Response characteristic in the horizontal bending mechanism.

また、エンドエフェクタ位置での屈曲発生力と把持力の測定を行った。要求仕様には成人男性の肝臓の1/3程度を持ち上げることが可能な0.40 [kgf]を設定したが、全ての自由度においてこの設計値を満たす結果を得た (Table 1)。

表1 発生力とトルク。
Table 1 Generated power and torque.

DOF	Direction	Power [kgf]	Torque [mNm]
Horizontal	0 to 90°	0.70	118.6
	0 to -90°	0.85	144.1
Vertical	0 to 90°	0.40	165.7
	0 to -90°	0.50	207.1
Grasp	Close	0.85	60.8

C. 2 マニプレータ In vivo 実験

腹部外科手術用鉗子としての実用性を評価するため、気腹下にて動物(ブタ, 43kg, 雄)を用いた胆嚢摘出手術を行った (Fig. 7)。本マニプレータによる胆管の1回の結紮に要した時間は 26.9 ± 7.1 [sec]、トロッカーの挿入から胆嚢の切除終了までに要した時間は 44 m 30 s であった。

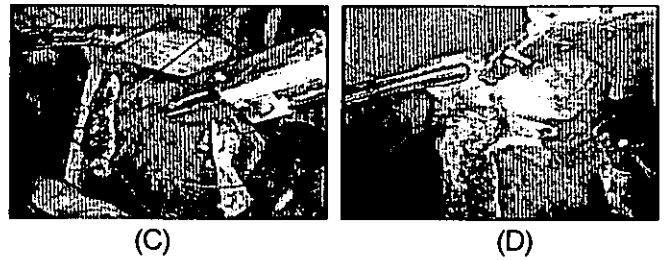


図7 胆嚢摘出手術の腹腔鏡映像。(A)胆管剥離。(B)胆管の下への糸通し。(C)針と糸による胆管結紮。(D)胆嚢剥離。
Fig. 7 Laparoscopic view of cholecystectomy with 3-DOFs forceps manipulator. (A)Detachment of the bile duct. (B)Letting a thread under the bile duct. (C)Stitch and ligation of the bile duct. (D)Detachment of the gallbladder

C. 3 力覚フィードバック付きインターフェース精度評価

3自由度について反力の理論値との誤差を補正し、フィードバックさせる力の精度を評価した。屈曲の2軸については $-450 \sim 450$ gf までの計算機からの入力に対してモータの軸から 105 mm の位置で反力の測定を行い、誤差平均 2%、標準偏差は ± 6 gf という結果を得た。把持については $-150 \sim 150$ gf までの入力に対してモータの軸から 50 mm の位置で測定を行い、誤差平均 5%、標準偏差は ± 6 gf という結果を得た。また、マスタロボットの屈曲角度を変化させ、200 gf の入力に対して同様の位置で力を測定した。屈曲の2軸については誤差平均 3% で標準偏差は ± 5 gf という結果を得た。把持軸については、100 gf の入力に対して誤差平均 3%、標準偏差は ± 4 gf という結果を得た。

モータの応答はリンク移動量に現れるので、リンクの移動量と鉗子先端部にかかる負荷との関係を求めることを目的とした。

鉗子ロボットの速度制御を行っているアンプへの出力電圧を 0, -1, 0, 1V の順に 0.2 秒間隔で変化させ、リンク位置の時間的変化を記録した。鉗子ロボット先端部の負荷は無負荷の状態から 50, 100gf と変化した。結果を Fig. 8 に示す。5 秒後のリンク移動量は、0, 50, 100 gf の順に -0.98 , -1.06 , -1.26 mm となった。

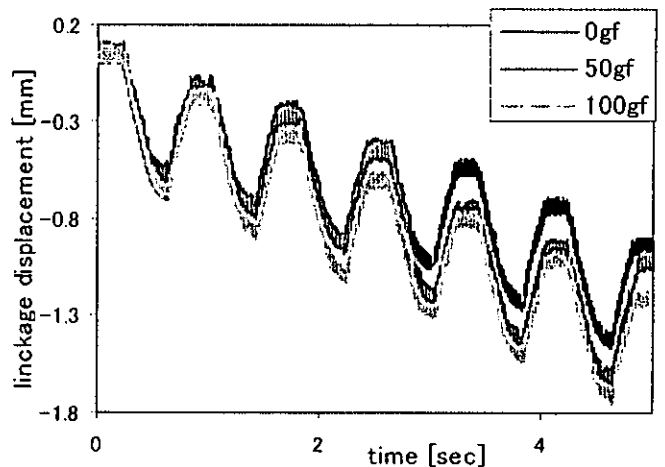


Fig.8 鉗子先端部の負荷とリンク移動量との関係

D. 考察

3自由度屈曲鉗子マニピュレータの高い再現性や発生力、広い屈曲範囲等の機械的性能は、より高度な腹腔鏡下外科手術を行うために十分有用といえる。インタフェースからの応答性には若干のばらつきが見られたが、In vivo 実験では術者に操作上の遅れや違和感を与えることはなく、45分以内で胆嚢摘出手術を行うことができた。

今後は臨床応用に向けマニピュレータの柔軟性を向上させ、先端部でより細かな作業を行うための自由度の追加が必要である。そのため、新たに多節スライダ・リンク機構の動特性解析や制御理論の確立を行い、直径5mm以下のマニピュレータの細径化を両立させる。これらの技術の実現により、腹腔鏡下外科手術の更なる低侵襲化、そして医用工学に限らず、他の工学分野への応用も十分可能である。

カフィードバックの精度は誤差が5%以内であり、力の有無を操作者に感じさせることは可能であると考えられる。今後は、細かな感触をフィードバックするためにも力センサを用いた測定により高い精度が求められる。

力センシングについては、負荷とアンプへの入力電圧が0Vに変化したときのリンクの移動量との間に相関があることがわかった。今後はモータトルクをアンプから出力されるPWMのデューティ比を測定し正確なモータトルクとの関連性を測定することが望まれる。

E. 結論

本研究では、多節スライダ・リンク機構を用い、腹部外科手術用屈曲鉗子マニピュレータの開発を行なった。新たに開発した多節スライダ・リンク機構は広い駆動範囲と高い再現性、大きな発生力という優れた機械的性能を有することを確認し、この機構を応用した腹部外科手術用の屈曲鉗子マニピュレータにより、従来の器具と比較してより柔軟で迅速な腹腔鏡下外科手術を行なえることを実証した。

今後は臨床応用に向け、マニピュレータの先端部でのより繊細な作業を行なうため、自由度を追加することによる柔軟性の向上に努める。そのため、新たに多節スライダ・リンク機構の動特性解析や制御理論の確立を行い、また直径5mm以下のマニピュレータの細径化を両立させていく。これらの技術の実現により、腹腔鏡下外科手術の更なる高度化と低侵襲化、そして医用工学に限らず、他の工学分野へと応用できるマニピュレータの開発も十分可能である。

F. 健康危険情報

特になし。

G. 研究発表

1. 論文発表

山下紘正, 金 大永, 波多伸彦, 土肥健純: 多節スライダ・リンク機構を用いた腹部外科手術用鉗子マニピュレータの開発, 日本コンピュータ外科学会誌, Vol. 5, No. 4, 2004 (in press)

2. 学会発表

Hiromasa Yamashita, Daeyoung Kim, Nobuhiko Hata, Takeyoshi

Dohi, Multi-Slider Linkage Mechanism for Endoscopic Forceps Manipulator, In Proc. of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), Vol.3, pp.2577-2582, Las Vegas, Nevada, October, 2003.

山下紘正, 波多伸彦, 飯村彰浩, 中澤東治, 橋爪誠, 土肥健純: 多節スライダ・リンク機構を用いた腹腔鏡下外科手術用屈曲鉗子マニピュレータの開発(第2報), 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, pp. 81-82, 愛知, Dec. 2003.

H. 知的財産権の出願・登録状況

特になし

分担研究者 佐久間一郎 東京大学大学院新領域創成科学研究科 環境学専攻 教授

研究要旨：X線やMRIを用いたロボットの大域的な位置モニタリング、変形する臓器に対する異種情報の相互のレジストレーション技術、患部の組織性状計測にもとづく局所的なナビゲーション技術、診断(計測)と治療のシームレスに接続するナビゲーション技術から構成される手術支援ロボット用のナビゲーションシステムの開発を行うことを目的に、本年度は(1)MRI模擬環境を有する実験システムの基本設計、(2)軟性臓器の力学モデリングのための肝臓の圧縮・引張試験の実施と、それに基づく有限要素解析に適用可能な構成式の提案、(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システムに関する基礎検討としての実験用光学ファントムの開発とそれを利用する計測空間分解能の評価、(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統合ソフトウェアの基本的な部分の開発と検証を行った。

A. 研究目的

本研究はX線やMRIを用いたロボットの
大域的な位置モニタリング、変形する臓器に
対する異種情報の相互のレジストレーション
技術、患部の組織性状計測にもとづく局所的
なナビゲーション技術、診断(計測)と治療の
シームレスに接続するナビゲーション技術から
構成される手術支援ロボット用のナビゲー
ションシステムの開発を行うことを目的とす
る。初年度においては、(1)MRI 模擬環境
を有する実験システムの基本設計、(2)軟
性臓器の力学モデリングのための肝臓の圧
縮・引張試験の実施と、それにもとづく有限
要素解析に適用可能な構成式の提案、(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の
空間分解能評価、(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手法について
検討することを目的とした。

B. 研究方法

(1) MRI 環境を模擬した実験環境の構築

X線やMRIを用いたロボットの大域的な
位置姿勢モニタリングでは、MRI内における
柔軟構造を有する内視鏡型ロボットシステム
における位置探索ならびにナビゲーション技
術の開発を行うことを想定し、ロボットなど
実時間制御を求められるシステムとの共存し
て使用することが可能なロボットの位置計測
技術、ロボットの位置情報をフィードバック
した標的画像計測技術等の開発が求められる。
このような技術の開発、評価のためにはMRI
機器における計測・情報処理とロボット制御
の同期などの最適化を行わなければならない。
本年度はそのような実験環境を構築するこ
とを目的に、実際の MRI における計測信号処
理・画像処理をシミュレートできる環境の基
本設計を行った。

(2) 肝臓の力学モデリング

軟性臓器の変形を扱うことが可能な手術ナ
ビゲーションシステムに関する研究につい
ては、軟性組織のモデリングに関する基礎検討
を行った。具体的にはブタ肝臓より取り出し
た直径 8mm、長さ 10-15mm の試験片の力学

試験（引張・圧縮試験）を行い、非線形の応力-ひずみ関係を実験的に求めた。次にこの結果をもとに有限要素モデルに適用可能な構成式の導出を行った。

試験片は Fig.1 に示すように、屠殺直後のブタ肝臓を入手し、外科用ナイフで試験片を取り出し、固定具に外科用接着剤で固定し、圧縮・引張試験を同一の試験片に対して実施できるようにした。試験は卓上小型試験機 (Eztest, Shimadzu Co.Kyoto,Japan)を用いた。圧縮・引張速度は1 から 1000mm/minとし、測定分解能 0.001N のロードセルを用いて力を計測した。実験の様子を Fig.2 に示す。またそのときの試験片形状の変化を側面よりデジタルカメラで撮影記録した。

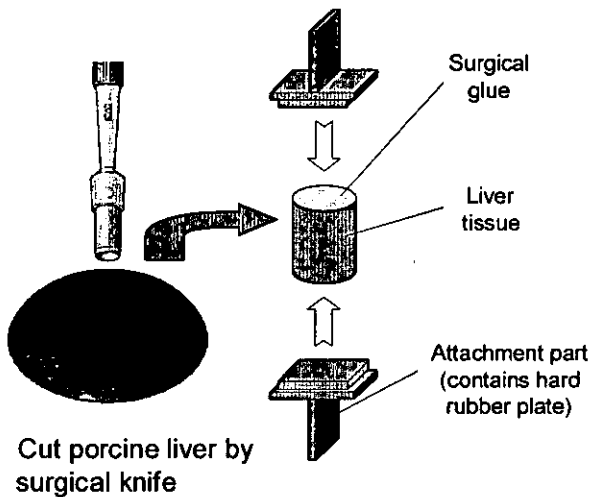


Fig.1 Preparation of a liver test piece

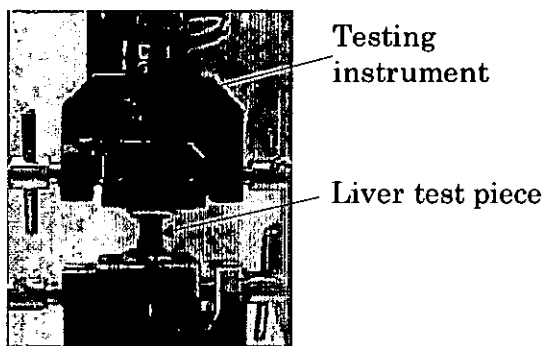


Fig.2 A liver test piece set on the testing instrument

(3) 5-Aminolevulinic acid(5-ALA)を用いた腫瘍部位の術中計測によるナビゲーションの基礎検討

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 Protoporphyrin9 (Pp9) 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。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、空間分解能などの基本性能の評価を行った。

蛍光誘導・検知システムの概要図を Fig.3 に示す。光源として使用した半導体レーザー (406[nm],18[mW], 特注品, Digital Stream Corporation) は一定の焦点距離を持つように収束して照射される。照射対象位置との距離を設定する事により照射スポット径を調節できる。蛍光はレーザーを照射した部位から無指向的に放出されるものとし、レーザースポットの中心に向けてプラスチック光ファイバ (POF) を配置する。収集した光は光フィルタを通る事で蛍光のみが抽出され、フォトダイオードで蛍光強度の信号として検出される。ここで照射対象として用いたファントムは発光体である Pp9 の他に散乱物質としてイントラリピッド (IL) 10%を含め、約 1%の Agar を用いて均質なゲルとする。Pp9 は disodium salt を用い 50[mg/l]とした。比較対象として Pp9 を含まないファントムが必要であり、これらが明確な境界面を持つよう、Fig.4 に示す容器を製作した。Agar によりファントムはゲル状なので境界面が保たれた。

ファントムを X-Y ステージに載せ、レーザーのパワーは約 2[mW]とし、照射スポット径を 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5[mm]に設定した。それぞれについてスポット径の大きさによる影響を調べるため、すべてに共通な位置 (Pp9 あり) における蛍光強度を測定した。また、ファントム (Pp9 あり, なし) の境界線を垂直にまたぐように 20[mm]の距離を直線状にスキャンした。この測定は 5 回ずつ行い平均を算出した。

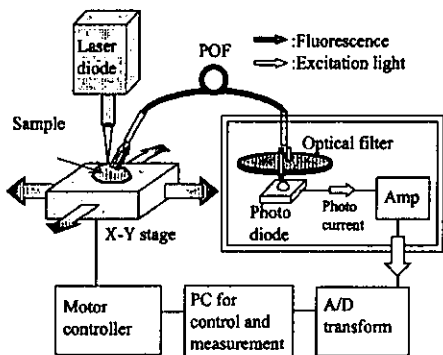


Fig.3 Overview of point measurement system.



Fig.4 Optical phantom with two borders (one of them is mentioned in the paper)

(4) 手術ナビゲーションシステム・手術ロボットシステムの統合に関する検討

近年腹腔鏡下手術において、術者の作業をより円滑に行うためのマスタ・スレーブシステムが注目されている。多くのシステムはマスタースレーブマニピュレータロボットシステムといった閉じた系で構成されるシステムであり、手術ナビゲーションシステム、各種術中計測システムとの統合が今後の課題となっている。

近年、拡張性を持たせるシステムの技術として、分散オブジェクト技術が注目されている。この1つである CORBA (Common Object Request Broker Architecture System) は、開発のプラットフォームに依存しないという利点を持つ。また、複数のシステムとの通信が可能で、容易な接続・拡張性の高いシステムである。

ここではこの CORBA を用い、モデルとして試作したマスタースレーブ手術支援ロボッ

トシステムを例にとり、その動作情報を外部へ記録することが可能な飛行機のフライトレコーダのような機能 (以下 Logger) を持つ Logger システムを試作し、手術用マニピュレータの動作を規則することを試みた。Fig.5 にシステムの概念図を Fig.6 に Logger システムの構成を示す。

ロボット制御のようにリアルタイム性を求められる情報通信と、他の比較的厳密なリアルタイム性を求められない情報通信を分離するために、前者を専用回線で、後者を CORBA システムで対応することとし、Fig.6 に示すシステム構成とした。

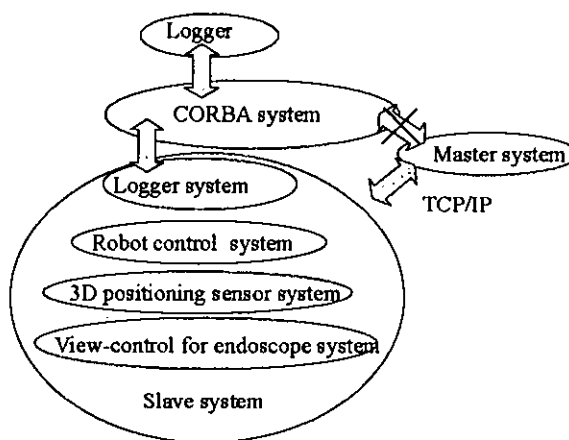


Fig.5 System architecture

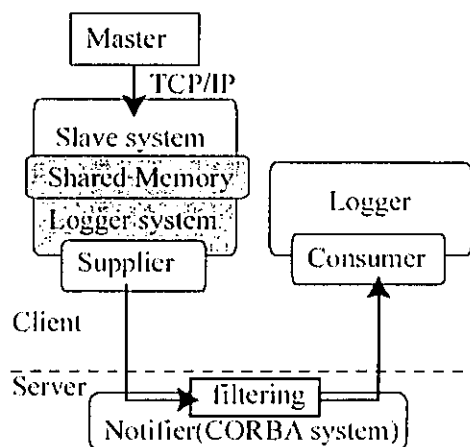


Fig.6 Logger system

(倫理面への配慮)

本年度の研究は工学的研究が主であり専門

業者より提供される肝臓を試料として使用することから特に倫理上の配慮をする必要はない。

C. 研究結果

(1) 実際の MRI で行われているデジタル信号処理、画像再構成のための計算等を模擬し、かつその外部からの制御を可能とする環境を構築する実験システムの基本設計・詳細設計を行った。MRI システムにおけるパルスシーケンスの制御、RF 信号のデジタル処理、画像再構成計算などを模擬データに対して実際に実施できる仕様のシステムを設計した。これによりロボットコントローラと MRI 計測制御コントローラの動機制御、ロボット先端に取り付けた RF コイルからの信号の処理によるロボット位置の MRI 内での計測、ロボット位置に対応した断面での MRI 撮影制御などの基本実験を行うことを目的に、必要な部品を導入し、システム構築を進めている。ハードウェア製作、ソフトウェア開発は現在まだ進行中であり、本格的な試験システムの稼動を来年度中に開始できるように研究を進めている。

(2) 軟性組織の力学モデリング

ブタ肝臓試験片の引張・圧縮試験の結果の平均値をまとめたものを Fig.7 に示す。

生体組織の構成式として提案されている Mooney-Rivlin, Fung, Hayashi らにより提案されているひずみエネルギー関数にこのデータをカーブフィットし、どの程度これらのデータに適合するかを検討した。その結果、ひずみの多項式と対数関数を組み合わせた形式で最もよく実験結果を再現することが可能であった。この結果をもとに新たな多項式と対数関数を組み合わせた形式を提案した。

提案するひずみエネルギー関数を用いて、直径 3 mm, 長さ 5-6mm の別の試験片 4 個で得られた応力-ひずみ関係の平均値をどの程度再現できるかを検討した。その結果を Fig.8

に示す。

構成式を導出するために使用した試験片とは異なる直径を有する試験片の挙動をある程度再現できていることがわかる。今後はこれを非線形有限要素解析による臓器変形モデリングに応用し、軟性臓器の変形予測の研究へ展開することを検討している。

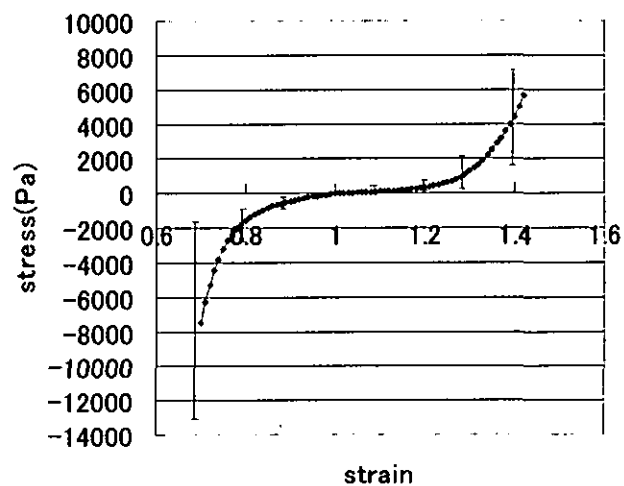


Fig.7 Relationship between nominal stress and strain of liver test pieces

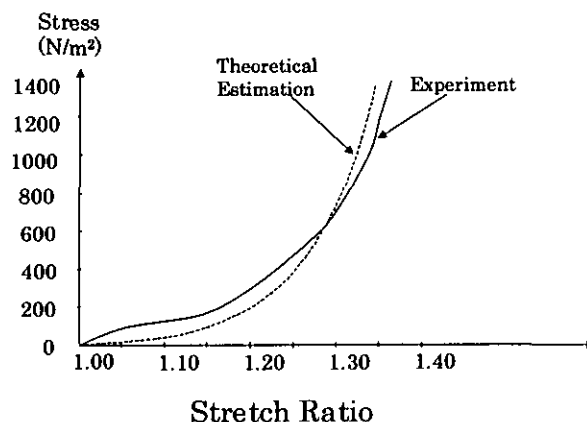


Fig.8 Validation of the combined logarithmic and polynomial equation using experimental results from smaller samples.

(3) 5-ALA を用いた術中ナビゲーションに関する基礎検討

今回使用した小型半導体レーザー（波長 405nm）により、5-ALA の代謝物である Pp9 を効率よく励起し、蛍光計測することが可能で

あった。生体中での Pp9 濃度を模擬した試料で検討したところ、十分な信号強度を与えるには $2.0[\text{mW}/\text{cm}^2]$ 以上の励起光強度が必要であった。

今回開発した光学ファントムの蛍光スペクトル特性を計測した結果を Fig.9 に示す。図に示すとおり 5-ALA の代謝物である Pp9 の単純な水溶液と 5-ALA を投与した健常なブタ脳標本の傾向スペクトルは異なっており、今回作成したファントムではイントラリピッドと Pp9 の相互作用により蛍光スペクトルがシフトし、実際の脳標本で観測されるものに近い蛍光スペクトルを有することが確認された。光散乱特性・蛍光スペクトルともに生体脳組織に近い特性を有するファントムを開発することができた。

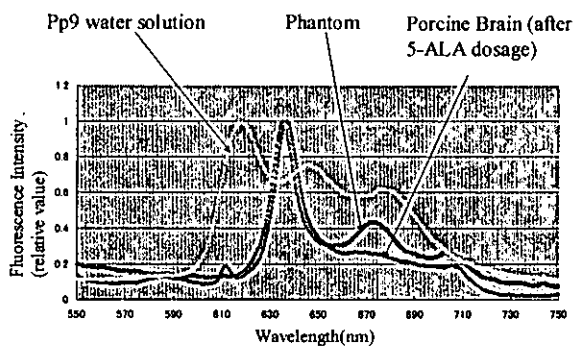


Fig.9 Fluorescence spectra of Pp9 water solution, Porcine Brain after 5-ALA dosage, and the developed phantom

スポット径と蛍光強度の関係を Fig.10 に、直線スキャンの結果を Fig.11 に示す。

本結果からも、脳組織における光散乱の影響を受け、計測の分解能は 1mm 程度であると考えられた。また、データは割愛するが、CCD カメラを用いた蛍光染色境界の同定結果からも分解能は 1mm 程度と考えられた。

(4) 手術ナビゲーションシステム・手術ロボットシステムの統合に関する検討

試作した Logger システムにより記録された手術支援マニピュレータの動作を記録することが可能であり、このデータをもとに手術

支援ロボットの動作の再現が可能であった。通信速度に関しては、現在のソフトウェアシステムでは、30msec に一回のデータ記録を確実にを行うことが可能であった。

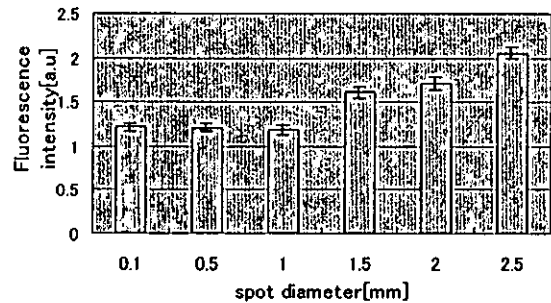


Fig.10 Fluorescence intensity versus spot diameter

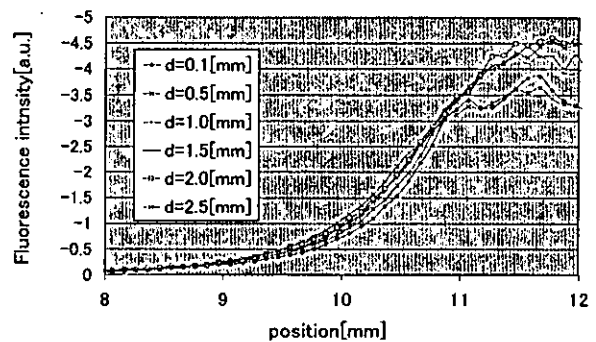


Fig.11 Fluorescence intensity versus position

(4) 手術ナビゲーションシステム・手術ロボットシステムの統合に関する検討

試作した Logger システムにより記録された手術支援マニピュレータの動作を記録することが可能であり、このデータをもとに手術支援ロボットの動作の再現が可能であった。通信速度に関しては、現在のソフトウェアシステムでは、30msec に一回のデータ記録を確実にを行うことが可能であった。

D. 考察

(1) MRI 環境を模擬した実験環境の構築

本年度は次年度以降の研究の基本的な環境となる実験装置の基本設計を行った。現在のところまだソフトウェアの開発を含め、実験

システムとして稼動する状態には至っていないが、次年度の早い時期に基本的な機能を整備し、実験システムとして早急に稼動することを目指す。

(2) 軟性組織の力学モデリング

本研究では実験手法において外科手術用の生体接着剤を試料の固定に用いるということで、同一の肝臓試験片に対して圧縮・引張の試験を同時に行うことを可能とした。これによりひずみが小さな領域から大きな領域まで連続的に計測をすることが可能となり、また圧縮・引張のサイクル試験を実施することが可能となった。

一般的に指数関数を用いたひずみエネルギー関数が多項式を用いたひずみエネルギー関数より肝臓試験片の圧縮・引張試験結果をよりよく再現できたが、多項式と対数関数を組み合わせた構成式が最も実験結果を再現することが可能であった。また平均値ではなく個々のデータに対して構成式をフィットさせたときの各パラメタの符号変化が Mooney-Rivlin の構成式に比べて小さく、この点は解析の安定性の観点からは重要である。

今後は得られた構成式を実際の有限要素解析に適用し、評価を行うとともに、ここでは考慮しなかった異方性についても検討する予定である。

実際のナビゲーションにおける変形への対応には、このような力学モデルのみを用いた手法ではその正確性に限界があると考えられ、術中に計測できる表面形状などの術中情報を利用する解析方法についても検討する必要がある。

(3) 5-ALA を用いた術中ナビゲーションに関する基礎検討

今回計測システムの小型化のために導入した青色半導体レーザ光源は、Pp9 の励起光としては適したものであり、5-ALA を用いた病変部位の蛍光計測による同定システムの小型化に極めて有効であると考えられた。

ヒト脳腫瘍組織における Pp9 の励起波長は 405nm である。波長 400nm 以下の紫外光は生体組織に対して有害であり、必要以上の照射は組織に損害を与える可能性がある。また、蛍光を検出する際、不必要な励起光波長により、脳組織に元来存在する Pp9 以外の蛍光物質

(自己蛍光) が励起してしまい、Pp9 蛍光検出の精度を低下させる恐れがあり、励起光源の波長帯域は可能な限り狭い方が望ましいと考えられる。使用したレーザ素子の波長帯域は非常に狭く、生体組織に有害な紫外光はほとんど放射されない。また、励起に不必要な波長が含まれないため、自己蛍光物質を励起させる可能性を抑えることができると考えられる。

術中蛍光計測による手術ナビゲーションを考える場合、その空間分解能を評価がナビゲーションの精度の検討には不可欠である。そのために脳組織に類似した光学散乱特性を有する Pp9 を含む光学ファントムを試作した。その結果生体中の Pp9 と類似の蛍光スペクトルを持つことが確認され、水溶液モデルの生体組織で観測される蛍光スペクトルの違いという問題を解決することが可能であった。

このファントムを使用した実験の結果励起光源ならびに蛍光の組織による光散乱のために、空間分解能が劣化し、その位置分解能は 1mm 程度と考えられた。CT、MRI など医用画像と組み合わせる蛍光計測による組織病変計測を使用する場合の精度の原理的な限界のひとつであると考えられる。

(4) 手術ナビゲーションシステム・手術ロボットシステムの統合に関する検討

拡張性を持たせるシステムの技術として、分散オブジェクト技術の 1 つである CORBA (Common Object Request Broker Architecture System) は、開発のプラットフォームに依存しないという利点を持つ。また、複数のシステムとの通信が可能で、容易な接続・拡張性の高いシステムである。このような性質は臨

床例によって使用する機器が変化し、さまざまな医用計測システム、治療システムが相互に接続する手術ロボットシステム環境には有効であると考えられ、手術シミュレーションシステム、ロボット制御システムへの応用が研究されている。しかしながら手術支援ロボットシステムにおいては機械系の制御など厳密な実時間性が求められる場合があり、一方MRI装置など比較的撮影の時間間隔が長く実時間性が得られない医用計測機器などが同一システム上に混在することが想定される。

このような条件下でのシステム構成として、実時間性を求める通信に関しては専用回線を使用し、それほど実時間性を求められない動作記録のデータ通信、あるいは速度のあまり速くないナビゲーションシステムからの情報などは共通性の高いCORBAを使用するといった構成を提案した。

E. 結論

本年度実施した手術支援ロボット用のナビゲーションシステムの開発を行うことを目的とする研究成果は以下の通りである。

(1) MRI 模擬環境を有する実験システムの基本設計を行い、次年度以降の研究開発環境整備の基礎を固めた。

(2) 軟性臓器の力学モデリングのための肝臓の圧縮・引張試験が可能な試料固定方法を提案し、実験を行った。これにより肝臓組織の非線形な応力-ひずみ関係を定量的に評価した。計測結果を再現する、有限要素解析に適用可能な構成式を種々検討し、多項式と対数関数を組み合わせたひずみエネルギー関数が最も実験結果を再現できるものと考えられた。

(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システムに関する基礎検討では、青色半導体レーザー光源(発振波長 405nm)は、Pp9 の励起光としては適したものであり、5-ALA を用いた病変部位の蛍光計測による同定システムの

小型化に極めて有効であると考えられた。また実験用光学ファントムの開発とそれを利用する計測空間分解能の評価を行い、5-ALA 投与ブタの脳組織で観測される蛍光スペクトルと類似の蛍光スペクトルを有する光学ファントムを開発した。これを用いた空間分解能の評価では、蛍光励起光、蛍光の組織による散乱の影響で空間分解能が 1 mm 程度と考えられた。

(4) 手術ナビゲーションシステム・手術ロボットシステムの統合に関する検討

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ソフトウェアとして CORBA を選択し、その利点・欠点を検討した結果、実時間制御が求められるロボット制御部分には別の専用通信回線を使用し、共通性が高く、比較的厳しい実時間性を求められない情報、例えば手術ナビゲーション情報、マニピュレータの動作記録情報などの通信に CORBA を使うことが望ましく、システムへの要求仕様に合わせた設計が重要であることを示した。

F. 健康危険情報

特になし

G. 研究発表

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・半導体レーザー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. 特許出願

術中病変部位の蛍光計測装置(出願準備中)

低磁場の MRI および手術支援ロボット手術室における MRI 環境等の開発

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：従来の手術ロボットがクリアできていない課題として、フレキシビリティの欠如と臓器拍動への未対応が挙げられる。そこで本研究では、MRI の中で可撓性を有するロボットおよび拍動測定機能を備えた臓器スタビライゼーションマニピュレータの開発し、基礎データの収集を行った。フレキシブルマニピュレータについては電流・曲げモーメント・磁場の間に線形性がみられ、今後の多自由度化に向けて有効な特性を有することを確認した。また、臓器スタビライゼーションマニピュレータについては、姿勢追従性については良好な特性を得られたものの、位置追従性については今後の改善が必要であることが分かった。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

従来の手術支援ロボットは剛性を高めるための不必要な大型化、ナビゲーション及びガイダンス技術との連携性の不足、フレキシビリティの欠如等の問題点がある。これらは、産業用ロボットの発想で手術ロボットが設計されていることが起因しており、現段階では、大型かつ高価な割に外科医の能力と同等レベルの作業しか実現できておらず、普及を阻害しているのが現状である。

そこで本研究では産業用ロボットの手法にとられない、手術ロボットならではの機構・構造・制御技術の開発を行う。フレキシビリティをもった術具の知的制御、マクロな絶対座標とマイクロな相対座標を各々前者は MRI・CT 等後者は内視鏡による画像誘導を用いたロボット制御、普及を目指した小型 MRI 対応ロボットの開発、精確な力学情報を取り入れたモデリング技術の開発を通じて、上記の目的を達成する。

B. 研究方法

B.1 MRI の中で可撓性を有するロボットの基礎検討

現在画像診断のみに使われている MRI の磁場を利用し、フレキシブルなチューブ状のマニピュレータ駆動法の基礎検討を行った。コイルを巻き付けたシリコンチューブに電流を与え、磁場から受けるモーメントにより駆動する方式をとる。外部磁場の方向を変えることで駆動方向を決定し、コイルの電流によって曲げ角度を変化させることが可能である。

そこで、今年度は外径 4mm、1 自由度のフレキシブルマニピュレータ基礎モデルを作成し、同時に仮想 MRI である外部磁場発生装置（0.1T まで磁場発生可能）を製作して、電流と曲げモーメントの関係、磁束密度と曲げモーメントの関係、電流と曲げ

モーメントの関係について、測定を行った。

B.2 拍動測定機能を備えた臓器スタビライゼーションマニピュレータの開発

手術支援ロボットが産業用ロボットと大きく異なる点として、作業中にロボット座標系と対象（臓器）の座標系が一定にならないことが挙げられる。患者の心臓の動き、呼吸による蠕動、臓器そのものの拍動により、対象は常に動き続けるが、それにロボットが対応できない限り、正確で微細な手術の実現は難しい。

そこで今年度は、空圧吸引によりターゲット臓器に張り付き、位置センサおよび加速度センサにて臓器拍動を測定する臓器スタビライゼーションマニピュレータの開発を行った。開発したマニピュレータは吸引部リンク機構・平面リンク機構からなり、ワイヤ駆動と電磁クラッチを用いることにより拍動計測時はパッシブな制御、目標位置までの移動にはアクティブな制御を用いる。それらを検査する指標として、開発したスタビライゼーションマニピュレータ拍動追従性の応答性評価実験を行った。

どちらの実験に関しても動物実験は未だ行っておらず、倫理に関して配慮する事項はなかった。

C. 研究結果

C.1 フレキシブルマニピュレータ実験結果

電流と曲げモーメントの関係を力センサにより計測した。電流を 0～2A まで可変させ、25,50,75,100mT のそれぞれの場合において、線形性を確認した。また、磁束密度と曲げモーメントの関係も同様に測定をおこなった。磁束密度を 0～100mT に変化させ、1.0,1.5,2.0A のそれぞれの場合において、線形性を確認した。

曲げ角度と電流の関係も画像処理ボードによって計測し、0～2A の範囲において線形性を確認した。

C.2 拍動追従性能実験結果

3次元位置計測装置 OPTOTRAK を用いて、スタビライザーをパッシブに動かした際の姿勢計測を行った。測定精度は約 0.1mm となり、高い精度で姿勢追従を行っていることが分かった。

また、ワイヤを介したエンコーダによる位置精度評価実験を行った。時間遅れとしておよそ 100ms、位置誤差としておよそ 0.6mm が観測された。

D. 考察

D.1 フレキシブルマニピュレータ実験結果

各実験に線形性がみられ、電磁力及び材料力学の理論通りの結果が得られた。このことは、制御性の容易さを裏付ける特性であり、容易に多自由度化が可能であることを示唆するものである。

D.2 拍動追従性能実験結果

位置計測においてやや誤差がみられたが、これはワイヤの伸び、たるみによることが原因だと考えられる。今後は最適なワイヤテンション・伸び補償法を導入し、これらを解決していく必要がある。

E. 結論

新方式のロボット手術を行う基礎検討として、上記 2 モデルの要素試作を行い、基礎データの取得を行った。今後は統合的なシステム、滅菌法の確立などをクリアし、臨床へむけてさらなる検討・開発を行っていく。

F. 健康危険情報

特になし

G. 研究発表

元吉正樹、岡本淳、藤江正克；磁気駆動型マニピュレータ機構の開発、ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集 (CD-ROM) 2004-6 (掲載予定)

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を開始した。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試作と臨床での検討を行った。3)新たなロボティクスの構成要素として、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。

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-

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) 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-

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。

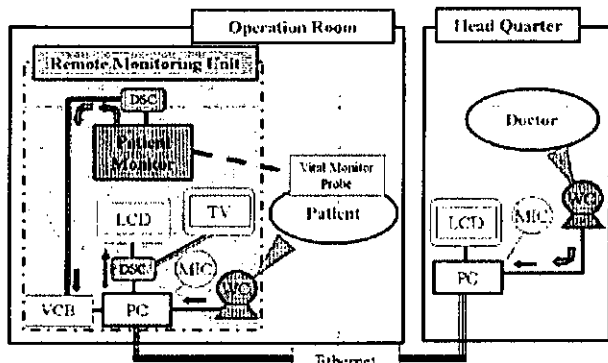


Fig. 1 遠隔モニタリングシステム構成図
小型遠隔モニタリングユニット (Remote Monitoring Unit) で取得した患者バイタル情報はベッドサイドモニタからダウンキャンコンバータ (DSC) ビデオキャプチャボード (VCB) を介してユニット内PCに取り込まれる。ユニット内PCからのバイタル情報、患者映像・音声は、Ethernetを介して遠隔 (手術室外) の医師サイドのPCに送られ、表示される。

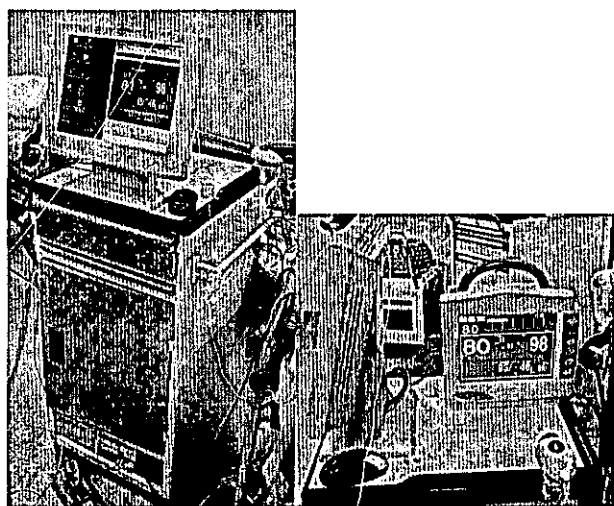


Fig. 2 小型遠隔モニタリングユニット (Remote Monitoring Unit)
手術場及び病棟でのベッドサイドでのモニタリングを考慮し、床頭台内にアイソレーショントランス、PC、ダウンキャンコンバータ等を備える。ベッドサイドモニタと小型PCカメラ、マイクの情報PC・ネットワークを介して遠隔監視拠点に配信する。

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。

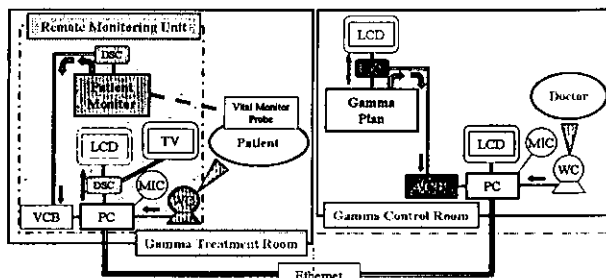


Fig. 3 ガンマナイフ治療用遠隔モニタリングシステム構成図
基本構成はFig.1に順ずる。本例では、他の遠隔拠点 (学内研究室など) からの治療支援が可能となるように、ガンマナイフ治療計画装置 (Gamma Plan) の映像をDSC・VCBを解してコントロールルームサイドのPCに取り込み、遠隔に治療計画を確認可能ようにした。

3) 手術マニピュレータの多機能・高機能化 -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 (図)。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. 4 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。

以上1)~3)の事項について基礎的研究を行った。

(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。

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-

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の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。

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. 5 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。

3) 手術マニピュレータの多機能・高機能化

-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、臨床上的有用性を確認することができた。現在のところインター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、インター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. 6 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。

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、本ソフトウェアはオープンソースのソフトウェアであるので、ソフトウェア自身の改良・最適化についても検討する。

また本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、今後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、執刀医・指導医・技術者など複数の拠点でモニタリングできる多次元多地点モニタリングシステムの構築を目指し検討を行う。

3) 手術マニピュレータの多機能・高機能化

-多自由度超音波凝固切開マニピュレータの開発・試作-

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。

今年度の試作・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。

E. 結論

本年度は以下の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、臨床において患者バイタル情報の遠隔モニタリングに成功した。今後更新速度を中心とした性能向上と高機能化を図る。
- 3) 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。

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, 南部恭二郎: Intuitive Visualization of medical Information, 日本臨床, 62(4), 607-611, 2004

2. 学会発表

中村亮一, 村垣善浩, 伊関洋: Intelligent Operation Theater: 情報誘導下手術とロボット手術, 第16回日本内視鏡外科学会 パネルディスカッション ロボティックサージェリーの現状と将来, 岡山, 12月4~5日, 日本内視鏡外科学会雑誌, Vol18(7), pp144, 2003

小倉玄, 中村亮一, 村垣善浩, 高倉公朋, 伊関洋: 小型振動子を用いた多自由度超音波凝固切開装置の開発, 第12回日本コンピュータ外科学会大会, 名古屋, 愛知, 12月13日~14日, 2003

H. 知的財産権の出願登録状況(予定を含む)

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

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。同時に消化器癌への適応拡大のためには研究は①微小癌細胞の検出同定、②画像データのレジストレーションによる拡張現実感の獲得(ナビゲーション部の開発)、③マイクロマシン技術によるマニピュレーション部の開発、の3つに分けて推進する。本研究成果もたらされるものは「やさしい医療」であり、従来の診断治療の安全性や根治性の向上、治療時間の短縮による侵襲の低下、高齢者や進行例に対する適応拡大、医療費の低減がもたらされ、国民の保険・医療・福祉の向上などが期待できるものと考えられる。

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。研究対象は胃癌とするが、成果は他の消化器癌や泌尿器癌にも発展させうる。

B. 研究方法

以下の要素研究を順次推進する。

①画像誘導技術の開発

超小型磁場センサを用いた管腔内からの三次元画像作成に関する研究
CT、MRI による仮想化胃内視鏡撮像技術の開発
マルチモダリティ画像データの実画像へのレジストレーション技術の開発

②内視鏡型ロボット制御のためのマンマシンインターフェイスに関する研究

多自由度他屈曲微細マニピュレータの開発
収束超音波による経消化管的切除法の確立

③ 既存のロボットシステムの臨床的評価

マスタースレーブ型手術支援ロボット da Vinci と ZEUS による臨床的基礎的検討を行い、新規開発するロボットに実装する機能や、駆動部の要求仕様を明らかにする。

(倫理面への配慮)

本研究での個人情報情報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。臨床応用に際しては本学倫理委員会の承認を申請し、患者から治療の効果と危険性も含めた十分な説明のうえ、書面による承諾を得て実施するものとする。現在までに手術支援ロボット da Vinci、ZEUS、共焦点内視鏡など、複数の先端医療機器の臨床応用を倫理委員会と患者の同意を得て遂行してきているのでこれを踏襲する

C. 結果

本年度は術前画像と内視鏡画像を統合して術者に提示する拡張現実感表示ナビゲーションシステムを開発し、腹腔鏡下手術6例に応用してその有用性を検討した。また局所治療画像誘導構築の基礎研究として、術前CT画像に基づく仮想化内視鏡像を作成し、胃癌局所治療のシミュレーションを2例に行った結果、切除範囲の提示に有効であることがわかった。内視鏡手術支援ロボット da Vinci、ZEUS による検討の結果、狭小な作業領域下で、最も複雑な縫合操作を行うためには7自由度の鉗子先端動作、鉗子先端の姿勢協調性が特に重要でありことが明らかとなった。

D. 考察

術前画像と内視鏡のライブ画像を同一座標系に統一、重畳表示を行う技術は内視鏡ロボットによる局所治療にもそのまま応用可能と考えられる。本技術の応用によりより正確な内視鏡的早期癌治療が可能となる。既存の内視

鏡下手術支援システムは、マスタースレーブ型手術ロボットとして十分な精度と実績を有しており、基礎的検討結果は新しい内視鏡型ロボットの開発に活用することができる。今後はロボット設計要求仕様をより詳細に検討していく予定である。

E. 結論

今年度、特に術前画像を内視鏡治療に活用する技術開発と、マニピュレーション部に必要な自由度などの要求仕様が明確となった。

G. 研究発表

【論文発表】

- 1) Muragaki Y, Hashizume M, Hashimoto D, et al, A new concept of three-dimensional endoscope for practical use of endoscopic surgery, Surg Endosc. 2003 Nov;17(11):1838-9
- 2) Hashizume M. Robot-Assisted Gastric Surgery. Primer of Robotic and Telerobotic Surgery. ed by Garth H. Ballanryne, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2003 p 1429-1444
- 3) 安永武史、橋爪誠、奥山稔朗、他：内視鏡把持装置Naviot® 58臨床適用例の検討、第12回日本コンピュータ外科学会大会 合同論文集、pp.137-138, 2003
- 4) 小西 晃造、橋爪 誠 一般外科におけるコンピュータ外科の現状と将来 現代医療 V ol135 No. 3 pp625-630 2003年
- 5) 小西 晃造、橋爪 誠、中本 将彦、他 光磁気ハイブリッド三次元位置センサによる鏡視下手術ARナビゲーションの開発 -実時間磁場歪み補正のin vivo精度検証- 日本コンピュータ外科学会大会論文集2003 pp165-166

【学会発表】

1. 小西 晃造、橋爪 誠、金城 直、他 第39回日本腹部救急医学会総会 (平成15年4月17, 18日 弘前)
2. 第16回日本内視鏡外科学会総会 (平成15年12月4-6日 岡山) 術前CT及びMRAを用いた腹腔鏡下脾臓摘出術術中ナビゲーションの試み
3. 小西 晃造、橋爪 誠 第8回MRI研究会 (平成15年12月15日 東京) 腹腔鏡下手術支援ナビゲーションシステムの開発

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。本年度は本システムの要素技術の一つである再帰性投影技術に関して提示画像の輝度補正技術、ならびにレジストレーション手法について研究開発を行った。

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、身体などの実世界情報にMRIなどで得られた情報を重畳表示し、より直感的でわかりやすい医療情報を提示することが本研究の最終目標である。この目標を実現するため、バーチャルリアリティの技術の中で、特に現実空間にバーチャルな情報を重畳表示する技術である「オーグメンティド・リアリティ」を応用する。AR技術は、

バーチャルな存在を提示することで現実世界での行動を補助することを目的としており、その特性上特に視覚に関する研究が多い。例えば手術の際に患者の皮膚をバーチャルに透明化する手法や、機械の利用に際して説明表示を実世界と重畳して提示する、などの応用が検討されている。本年度は特に、AR研究の中で前述の目標を達成するための視覚情報提示機構として再帰性投影技術(RPT: Retro-reflective Projection Technology)を対象とし、RPTを前述の目的に応用するための要素技術の研究開発を目的とした。

本年度はRPTを「患者・医療情報統合システム」に応用する場合に問題となる2つの問題を解決する要素技術の研究開発を行った。第1の問題はRPTを実用化する際には焦点深度(すなわちワークエリアの奥行き方向の広さ)と網膜照度(すなわち提示するバーチャル情報の明るさ)はトレードオフの関係にあることである。また、第2の問題は実世界の空間座標系とバーチャル情報空間の座標系とのレジストレーションの問題である。

第1の課題に対しては、プロジェクト光学

系に対して、口径が可変の絞りを追加し、開口径を動的に制御することで焦点深度と輝度の確保・補正を両立させる技術を実現することを目的とした。また、第2の課題に関しては画像を投影する部位にスクリーンとしての機能と3次元位置計測用のマーカーとしての機能を同時に実現する技術の確立を目的とした。

B. 研究方法

B-1 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、まず RPT の概要を説明する。

B-1-1 再帰性反射材の概略

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



図1 再帰性反射

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

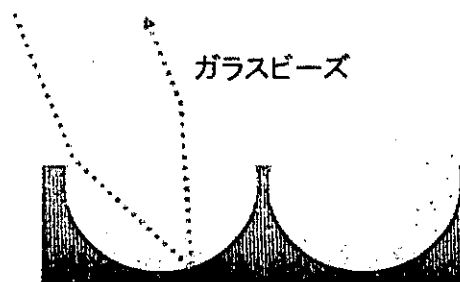


図2 ビーズ式再帰性反射材

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

ズタイプの反射輝度は落ちる。

B-1-2 RPT の原理

特性上、再帰性反射材は反射に関して非常に高い指向性を持つ素材となっている。RPTはこの特性を利用し、再帰性反射材を塗布あるいは貼り付けることにより任意形状の物体をスクリーンとして用い、プロジェクタにより提示物体を投影するというものである。再帰性反射材は光源と同方向に大部分の光が返ってくるので、ユーザはハーフミラーによって作られたプロジェクタと光学的共役点にある地点から映像を観測することになる。非常に高輝度な映像が得られる為、たとえ日中であってもスクリーン上への投影・提示が可能である。(図3)

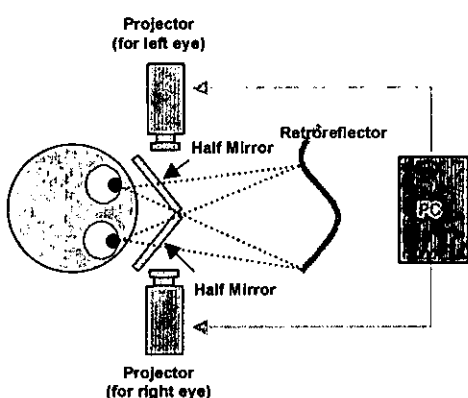


図3 RPTの構成図

このシステムの特長としては以下のような点が挙げられる。

- (1) 再帰性反射の特性上高輝度・高指向性であり、小型プロジェクタで日中でも映像を提示可能
- (2) スクリーン形状に起因する像の歪みが生じない
- (3) 大きな焦点深度を持ち、任意形状、任意

位置のスクリーンに対し、広い範囲で結像可能

- (4) 再帰性反射材を塗布可能な任意の物体をスクリーンとして利用可能
- (5) 水晶体調節・相互遮蔽問題を解決可能

これらの特長に加え、さらに、それぞれの要素を融合することで、スクリーン輝度の距離依存性の減少(1)+(2)、手などの物体とスクリーン面との大きな輝度差による適切な遮蔽関係(1)+(3)、両眼像の空間的分離による裸眼立体視(1)+(2)+(3)といったような単独では生まれ得ない効果も各要素を同時に満たすことにより、発生する。

B-2 絞りをを用いた輝度の動的補正

B-2-1 RPTにおける焦点深度と網膜照度の関係

ARディスプレイにおいて、実世界とバーチャル世界とのシームレスな融合が重要となる。自然な融合を実現するには、現実世界と同様な輝度とコントラストを持つ、ボケの無い映像の提示が重要である。RPTにおいては、観察点と共役な位置にプロジェクタを配置し、再帰性反射材を塗布、貼付した部分をスクリーンとして画像を投影する事で、スクリーンによる実世界との前後、遮蔽関係を維持したまま高コントラストの映像提示を行う事が出来る。また、プロジェクタ光学系の先に絞りを設けることで、焦点深度が深くなる特徴も備えており、AR分野でのディスプレイとして期待される。

しかし、深い焦点深度を得るためにはプロジェクタの光学系にピンホールを付加する必要がある。この時、ピンホールとレンズの位置が一致していると仮定した場合、焦点深度をレンズの屈折力変化量 ΔD [D: Diopter]、