

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

手術支援基盤システム及び画像支援型MR X手術室環境構築に関する研究

分担研究者 渡部 滋 株式会社日立メディコ 技術研究所

先端アプリケーションソフト開発センタ 副センタ長

研究要旨：従来の手術ロボットでは困難な体内深部、狭小領域での手術を可能にするために可撓型内視鏡の構造をもつ手術器具を用いた手術を実現する手術室環境を構築する必要がある。高度な術式に精通していない術者にも、より低侵襲で安全性の高い手術を提供するためには、画像診断装置による画像支援が必要不可欠である。本研究では、手術用ロボット装置を臨床適用するための近未来型手術室の構想を実現すべく、国立がんセンター中央病院棟9階手術室フロアにMR X手術室を構築した。また、新たな手術用ロボット装置を実現する手術支援基盤システムの技術開発もあわせて実施した。

A. 研究目的

[I] 本研究事業の主目的である新たな手術用ロボット装置を開発するに際し、効果的かつ高い安全性のある手術を実施するには、患者体内に挿入する可撓性を持つ内視鏡的手術ロボット装置と、画像による手術支援装置とを統合することが重要である。具体的にはX線画像診断装置、X線CT装置、オープン型MRI装置を手術に併用することを想定し、種々想定される問題点を事前に抽出した。手術室における配置、手術室内に持ち込む機器から放射される電磁波ノイズへの対策、漏洩磁場対策、高耐荷重性の床構造、各種装置とベッドの動線、手術室のクリーンレベルの向上策を検討した。その検討結果に基づき、手術室環境の設計、施工、構築を実施し、国立がんセンター中央病院内9階手術室フロアに近未来型手術室(MR X手術室)を実現した。

[II] 本研究事業における主要な術具である可撓性をもった軟性内視鏡的な手術器具

の安全な、精度良い操作を支援するために、画像診断装置を併用することを想定している。そのため、各種医用画像を用いた手術支援のための手術支援基盤システムを構築した。

[III] 手術支援基盤システムにおいて、特に腹部外科を対象として、術前及び術中での腫瘍性あるいはその他の病変の識別能を上げるため、病変部分の領域抽出手法を開発した。これにより、術前及び術中における病変の領域抽出精度が高くなり、手術による病変部取り残しを判別するのに効果を発揮できるため、手術の効率向上に役立つと期待される。ひいては、患者の術後における5年生存率向上に貢献できると考えている。

B. 研究方法

[I] 可撓性を持つ軟性内視鏡的な手術ロボットの開発に関して、手術装置と画像支援装置とを統合することが有用である。画像支援装置としては、X線画像診断装置、X線CT装置並びにオープン型MRI装置を同一の手術室に設置した。画像支援装置と統合化された手術場環境を臨床に適用するために、外来電磁波に敏感なMRI装置に対して、X線診断装置及びX線CT装置が放射する電磁波によるノイズへの対策を重点的に検討した。MRI装置は、非常に微弱な外来電磁波でさえ感知するため、MRI装置のシールドルーム内には、電磁波を放射する電子機器は一切持ち込んではない。X線診断装置及びX線CT装置には、X線発生装置、X線検出装置などを装備しており、手術室に設置するガントリー部には、高周波ノイズを放射する各種デジタル、アナログ回路を搭載している。しかも、これらの装置が本来の機能、性能を確保した上で、装置自身に電磁波ノイズ対策を施すことは現実的ではないと考えられた。そこで、MRI装置とX線診断装置及びX線CT装置とをシールドカーテンなど電磁波遮蔽物で、電磁氣的に遮断することとした。この電磁波遮蔽シールドカーテンは特別に試作設計したものである。電磁波遮蔽性能70dBを達成できる材質選び、シールドカーテンを不使用時収納しておく場所の確保、及びその巻き取り方式などを検討した。シールドカーテンは、MRX手術室全体を覆う築造式の銅箔と電氣的に接続し、単独アースにより接地させ、外来電磁波を遮蔽し、MRI装置が発生する高エネルギーの電磁波を外部へ放出することを防止す

るようにした。

MRX手術室は、X線画像診断装置及びX線CT装置を設置している。X線被爆を防止するため、X線防護設備を手術室の6面全体に施し、病院棟の手術室フロア及びその上下のICUを含む病室等への放射線防護対策を実施した。

オープン型MRI装置は永久磁石方式で、ガントリー部の質量は約15トンである。国立がんセンター中央病院の9階手術室フロアに設置するには、高耐荷重対策を実施し、病院棟の躯体鉄骨を補強する必要があった。さらに静磁場発生装置である永久磁石のガントリー部を搬入するため特別な搬入計画、搬入方法を検討し、安全にガントリー部を搬入した。

X線診断装置は、X線管球とX線検出器であるFPD(Flat Panel Detector)が対向してC型のアームに取り付けられた構造をしており、これを天井から吊るすことで人体を撮影する。この装置の質量は約1トン強であり、これを天井から吊るすために補強鉄骨を病院棟の躯体鉄骨に取り付けた。X線診断装置は、対向するX線管球とX線検出器が人体の周囲を約180度回転することで、X線CT装置と同様に3次元画像収集が可能なコーンビームCTを実現できる。3次元画像を構成する単位であるボクセルはX、Y、Z軸方向ともサブミリ単位の精度が要求されるため、Cアームを固定する天井吊り具に関して、固定方法、製作精度を考慮し、要求精度を満たすものを採用し、設置した。

X線CT装置は、自走式であり、患者テーブルを移動させずに、ガントリー部を移動させるので、病院棟の手術室フロアに、

自走式のためのCT用レールを設置した。CT装置のガントリー部は1トン強の質量があるが、人体の3次元画像を得るためには水平度の精度を維持しながらガントリーを移動させることが重要である。人体の体軸方向をZ軸にとると、ガントリーの移動速度の精度及び自走式CTのレール部の水平度が、画像のZ軸精度を決定する。また、X、Y軸方向の精度は、ガントリーの対向するX線管球とX線検出器の幾何学的配置及びその回転精度に依存する。これらが、一定の精度を確保したままデータ収集するには、CT用レールの水平度が確保されている必要がある。そのため、約1トン強のX線CT装置のガントリー部を水平度2/1000以内を確保したまま、ガントリーが移動できるように病院棟の鉄骨に撓みを減らし、水平度を確保する鉄骨で補強した。

さらに、自走式CT装置は、自走のための駆動機構の一部をCT用レール内部に埋設している。自走のための駆動部が移動できるように、キャタピラー型のカバーを持ち上げながらCT用レールを走行する構造となっている。自走式CT装置の手術室設置に際し、血液や体液、生理食塩水や各種手術室で使用される液状物がキャタピラーに付着したり、レール部に浸透することを防ぐため、キャタピラー型カバーに防水シートを装着した。

MRX手術室は、新たな手術用ロボット装置を評価する場でもあるが、広範囲な利用が見込まれる高度な遺伝子治療に対応した施設でもあり、将来の拡張性も考慮し、クリーンレベルがクラス10,000の空調設備を実現した。

[II] 本研究事業における主要な術具である可撓性をもった軟性内視鏡的な手術器具から得られる画像は、本質的に歪みを有している。15,16年度において報告したが、ヒルベルト変換及び共線性の条件による歪み補正方法を適用し、期待された成果を上げることができた。この歪補正方法を含む手術支援基盤システムの開発を試みた。手術支援基盤システムは患者体内に挿入する内視鏡的手術装置と画像支援装置とを統合し、医用診断画像によって手術マニピュレータを誘導できる操作コンソールを想定している。この操作コンソール上で、軟性内視鏡画像とX線診断装置、X線CT装置、MRI装置から得られる医用診断画像との重畳表示や各種画像解析を実施する。

[III] 画像解析における病変の領域抽出に関して、撮像技術の発達に伴いさまざまな手法が提案されている。これらの手法は大きく分けると、画像輝度を判断基準として処理する方法とエッジ情報を基準とする方法とに大別される。

画像輝度に対して閾値を設定し、関心領域を抽出する手法では、その領域に輝度のむらがある場合などは、高い精度で抽出結果を得ることは困難である。また、CT画像のように抽出部位の画像輝度(=CT値)が既知のものであっても、関心領域と非関心領域との境界が曖昧な場合や、輝度が極めて近い領域が近傍にあった場合、その抽出領域が想定外の領域にまで達することがある。

一方、動的輪郭モデル(ACM: Active Contour Model)を用いた領域抽出の方法は、画像輝度そのものではなく、画像のエッジ情報により処理を行うため抽出領域の輝度

むらに影響され難いという特性を持つ。また、抽出したエッジ情報を空間的に連結して行う従来のエッジ抽出処理とは異なり、初期値として閉じた領域を与えるので、ノイズのある画像においても、必ず閉領域を抽出できる利点がある。さらに、動的輪郭モデルでは輪郭という空間的配位の情報があるため、動画において、ターゲットの追跡・抽出に応用されてきた。ターゲットの動きを追跡するには、微小時刻前のターゲットの抽出情報を初期輪郭に反映させ、次の瞬間のターゲットを抽出すればよい。このことは、時間的なターゲットの変動を位置的な変動に置き換えると、あるスライスにおいて抽出された部位を空間的に「追跡」することにより、その部位の三次元的な情報を高精度で抽出できることを期待させる。

しかし、動的輪郭モデルは、多くの場合、ノイズに弱いとされており、抽出結果のロバスト性に問題がある。また、パラメータが多く、その値を決定するためには経験則的な勘が必要である。さらに、動的輪郭モデルは、最小化問題を解くことと密接につながりがある。この種の問題には幾つかのアプローチがあるが、本質的に処理に時間のかかることが知られている。

以上を踏まえた上で、研究対象として動的輪郭モデルを採用し、それが抱える問題点を回避しつつ、よりロバストな領域抽出の手法の確立を目指した。なお、本年度の研究では頭部及び腹部MRI画像を対象とし、腹部内にできた腫瘍あるいは病変の画像抽出を目標とした。

(倫理面への配慮)

本年度は、新たな手術用ロボット装置の開発に関して、可撓性を持つ軟性内視鏡的手術器具と画像支援装置とを統合したシステムを評価するための手術室構築、脳外科及び腹部外科における手術支援のための基盤システム、手術支援基盤システムに組み込む病変の領域抽出技術の開発を主体に取り組んだ。現時点において、これらの開発に対して配慮すべき倫理面の問題はない。

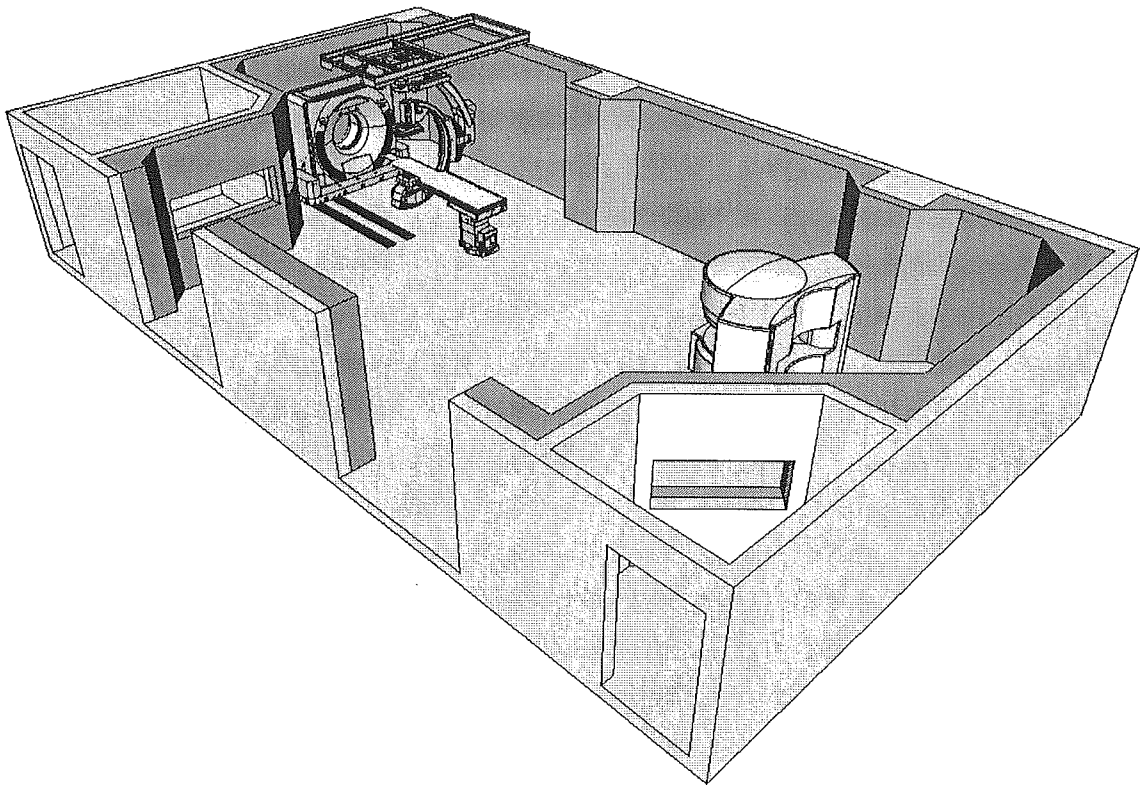


図1 MRX手術室鳥瞰図

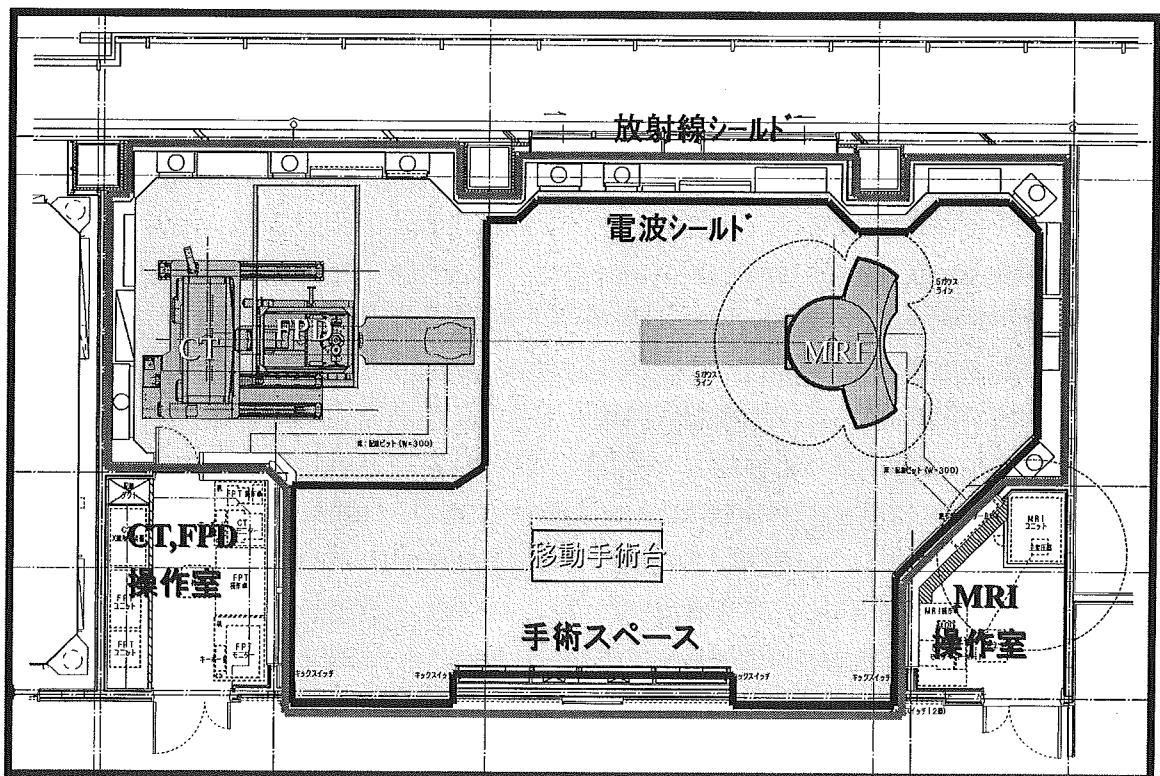


図2 MR X手術室の平面図(電磁波シールド、放射線シールドの両方を示す)

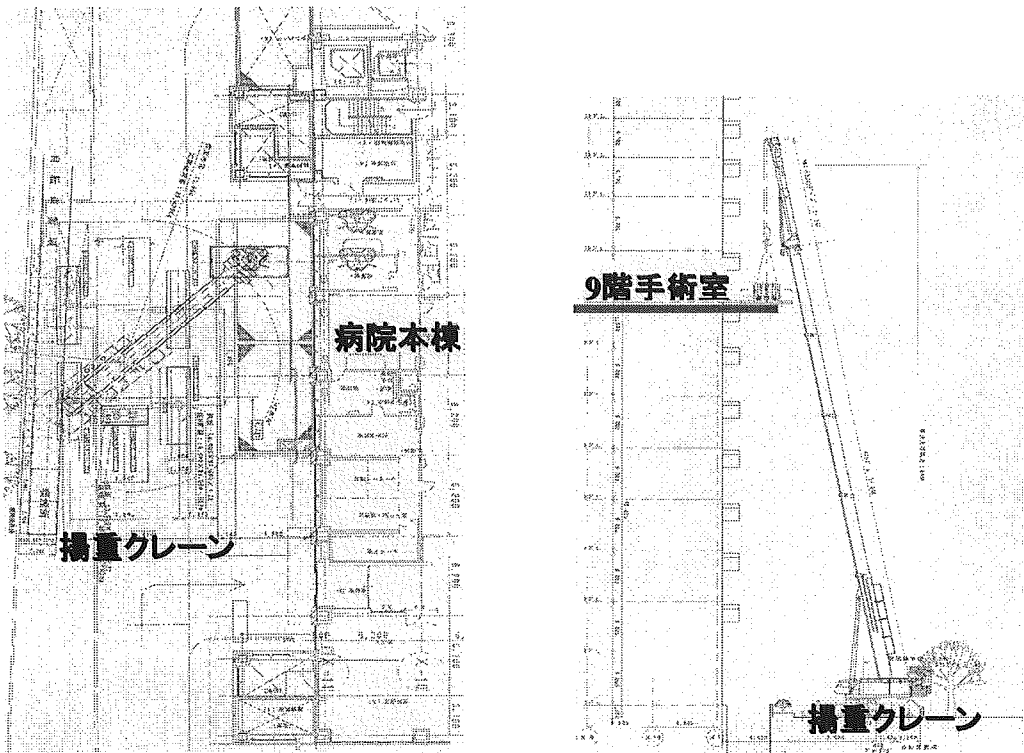


図3 360トンクレーンの配置図(9階手術室は地上約50mにある)

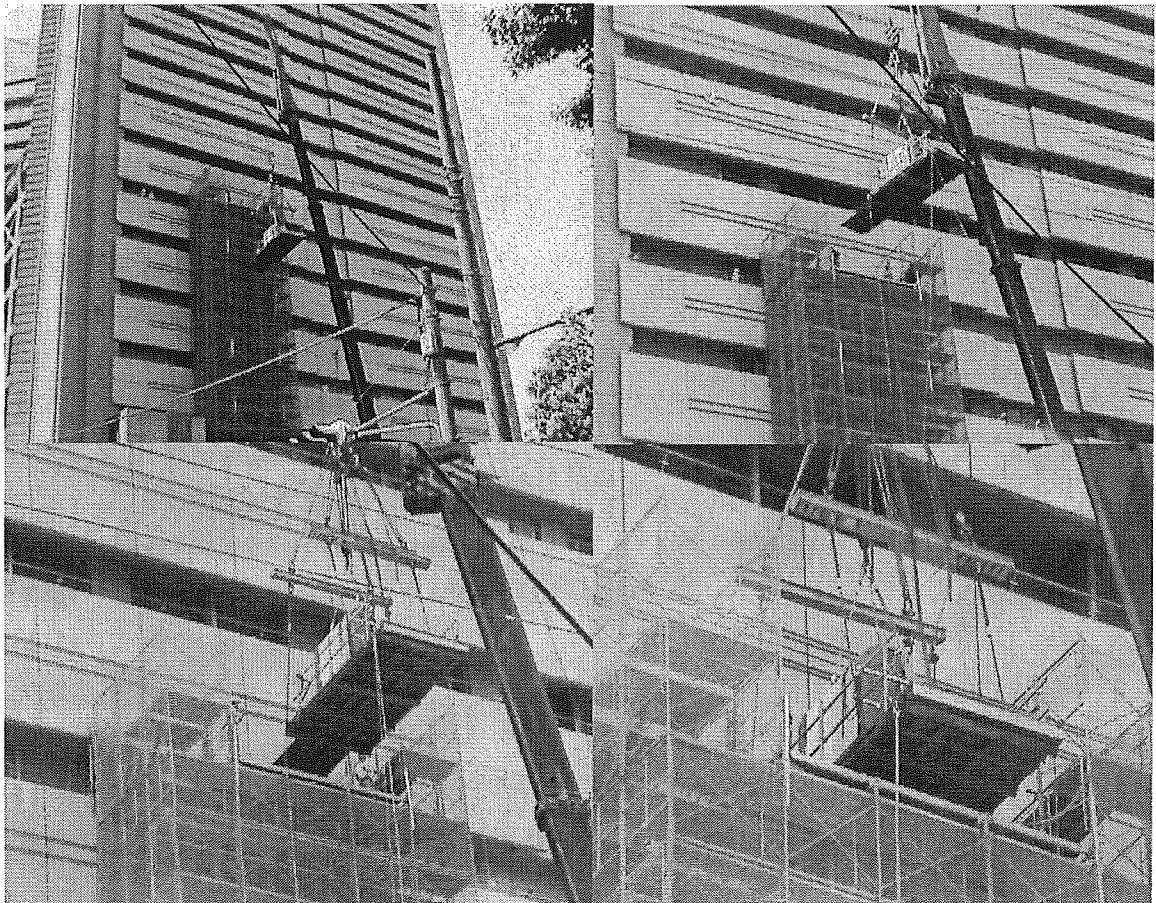


図4 オープンMRIガントリー部搬入状況

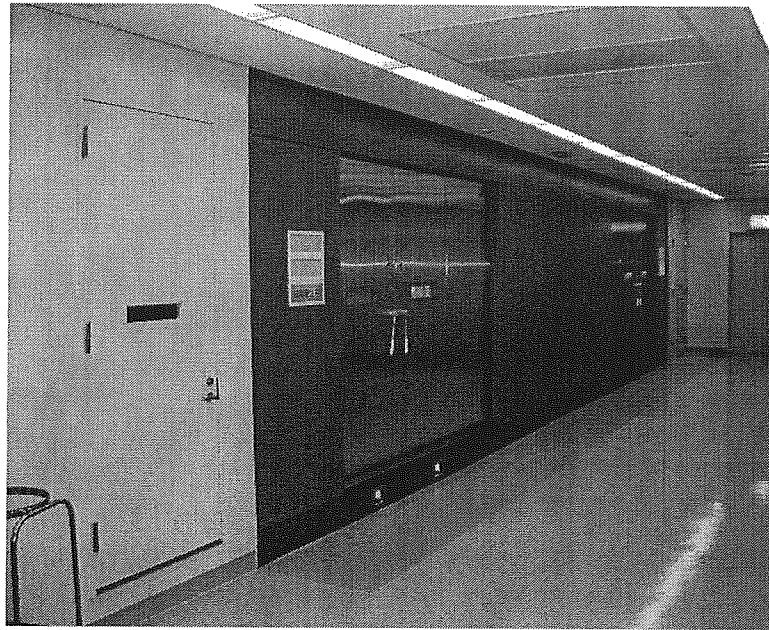
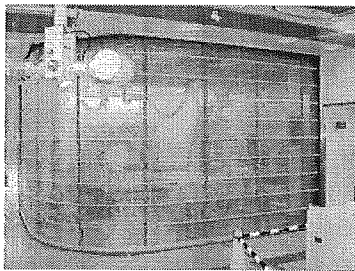
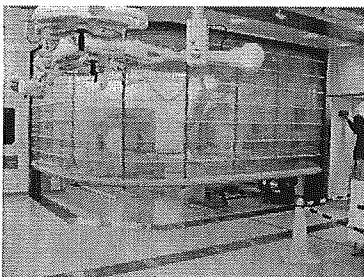


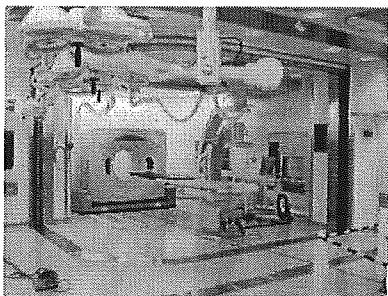
図5 MRX手術室正面



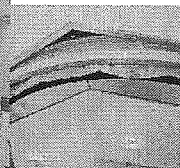
カーテン全閉状態



カーテン開閉（昇降）中



カーテン全開状態



天井BOX収納

図6 電磁波シールドカーテン設置後の情景

C. 研究成果

[I] 本年度は、昨年度に引き続き、MRX手術室に導入予定のオープン型MRI装置、自走式CT、X線画像診断装置の各装置を配置したMRX手術室の設計図面を作成し、具体的に手術場ユニット構築を実施した。手術場ユニットに持ち込むMRI装置は、患者の閉所恐怖症に対応して、圧迫感が少なく、患者空間の広い、手術に適したオープン型MRI装置を、X線CT装置は、手術ベッドが固定された状態で、ガントリー部が移動する自走式CT装置、X線画像診断装置は、X線検出器としてFPDをもつCアーム型で、デジタルラジオグラフィの機能を有するものを設置した。

昨年度に引き続き、今年度においても、手術室ユニット構築のため考慮に入れた項目を下記に列挙する。

- 1) X線画像診断装置及び自走式X線CT装置を、MRI装置と同室に設置する際の電磁波ノイズ対策、及びX線防護対策
 - 2) 手術室のオープン型MRI装置に対する高耐床荷重対策
 - 3) オープン型MRI装置の漏洩磁場対策
 - 4) 自走式X線CT装置のレールの水平度対応及び血液、体液、その他手術室で使用する各種液体に対する防水対策
 - 5) X線診断装置のCアーム部の天井吊り躯体構造に対する配慮
 - 6) 各種画像診断機器搬入に関する安全性に対する対策
 - 7) X線画像診断装置及びX線CT装置とMRI装置とを電磁波遮蔽するための電磁波シールドカーテン設置に関する配慮
 - 8) 手術室のクリーンレベル(クラス10,000)を確保するための空調設備
- 手術室環境構築において、最も注意を払ったのは、各種画像診断装置の設置の問題である。特に、永久磁石方式のオープン型MRI装置のガントリーは、質量が約15トン強あるため、手術室内の設置場所にはガントリーの荷重を十分受けられるように、病院本体の躯体に2本の脚部を載せるような配置をとり、3本目の脚部は補強鉄骨を配置し、荷重分散を図った。手術室フロアの元の設計では通常の事務所棟の荷重にしか耐えられる設計ではなかったため、補強を施した。

X線CT装置やX線診断装置に関しては、すでに述べたように、床構造の補強及び天

井吊り具の補強などを施した。

重量物の搬入に関して、特に質量が15トン強に及ぶオープン型MRI装置の搬入が大きな課題であった。そのため、綿密な搬入計画を事前に検討し、風雨や自然災害に対するリスクマネジメントを実施した。

今回特に研究開発上困難を伴ったものは、電磁波遮蔽のためのシールドカーテンである。電磁波遮蔽を実現する網目状のカーテンはシールド性能70dBを確保するため、二重の構造にし、目標性能を達成した。また、シールドカーテンをカーテンボックスに収納するための巻き取り方式は、二つの方策が考えられた。一つは、カーテンを水平方向に巻き取る横巻き方式、もう一つは、カーテンを垂直方向に巻き上げる昇降方式である。

当初は、シールドカーテンを横巻きに巻き取る方式を検討した。このカーテンの自重は数十Kg程度ある。カーテンをケーブルによって単純に巻き取る方式では、カーテンの自重のため、カーテン自身が垂れ下がりが、最終端まで巻き取ることが出来ないことが判明した。そこで、カーテンを引くケーブルを巻き取る中心部分に渦巻状の巻き取り構造を採用し、ケーブルの摩擦係数を軽減するためのビーズを装着するなどの工夫をしたが、渦巻き部分でのケーブルの摩擦が大きく、全体を巻き取ることが出来なかった。

検討の結果、昇降方式の巻き取り方式を採用した。昇降方式の構造では、平面図で見た際の形状がL字型をしているが、L字の角の部分の形状に丸みを持たせることで、全体にカーテンの昇降がスムーズに実施できるようになった。

シールドカーテン下部には、カーテンと床部分の密着度を向上させるため、カーテン下部にラバー型磁石材を装着した。また、床部分には電磁石を複数個埋設し、電磁石の吸引力でカーテン下部を吸引し、電磁遮蔽性能70 dBを確保した。また、床に埋設した電磁石の温度上昇に関しても、長時間通電によって45度以上には上昇しないことを確認済みである。

手術室に必要な无影灯に関して、中央手術台を照明するため、2基の无影灯を配置した。1基については、オープン型MRIの近くに設置するため、非磁性の材質であるステンレスを主体に構成した。これにより、无影灯が磁力で吸引され、永久磁石に引き込まれるのを防止した。また、別の1基については、オープン型MRI装置の漏洩磁場強度の5 Gaussラインよりも十分離れた位置に設置するため、特に非磁性材を使用することは考えなかった。

手術に必須の麻酔器は電磁波ノイズを発生しにくい機種を選び、購入することとした。また、設置場所は5 Gaussラインの外部とした。

また、術者が手術に注力する余り、オープン型MRI装置の強磁場下で手術していることを意識していないことがありうる。これを防ぐために、磁石に近づいている警告となるように、赤色灯を15基天井に取り付け、術者が磁場内に入ったことが分かるように、5 Gaussラインを越えて進入したとき、手などに赤色で注意喚起できる環境とした。

〔II〕本研究事業における患者体内に挿入する内視鏡的な挿入部を持つ手術装置と手術支援システムとを統合することを考慮し

た場合、内視鏡像とCT、MRI画像等を重畳して表示する手術支援ナビゲーションシステムを開発する必要がある。このシステムは最終的に、脳外科や腹部外科手術など複数の外科手術に適用できるものを目指す。

脳外科や整形外科手術領域では、ナビゲーションシステムによる画像誘導手術がすでに始まっている。本研究における手術支援基盤システムとして、内視鏡的な手術器具の位置・姿勢センサーを用いた術具追跡や高速画像描画システムなどを具備する必要がある。腹部外科を想定したとき、対象臓器の呼吸動による動きをリアルタイムに内視鏡画像や医用診断画像に反映させ、術者に必要な視覚的情報を即座に表示できる手術支援ナビゲーションシステムを構築する必要がある。

このため、システムには、位置・姿勢取得装置、内視鏡・X線診断装置・X線CT装置・MRI装置・超音波装置から術中に医用画像を取得する装置、マルチモダリティ共用データベース、画像解析及び画像表示機能を備えるナビゲーション装置、内視鏡手術支援システムを操作するための操作入力装置などを統合する手術支援基盤システムとしての機能統合化ソフトを開発した。

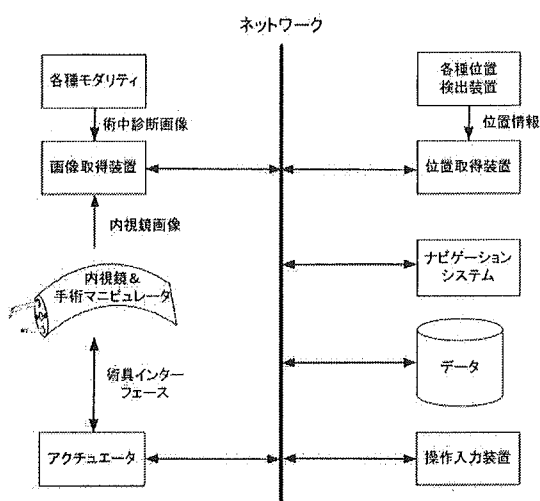


図7 システムの機器構成図

図7は可撓型内視鏡的手術システムを考慮したときの機器構成図を示す。これらの各種要素間を繋ぐネットワークには高速にデータ転送が可能なネットワークシステムを利用する。

手術支援基盤システムの中核になる手術支援ナビゲーションシステムは、複数の外科手術に対応し、各種手術プロトコルに対応するため、多種多様な用途を満たした機能が必要である。さらに、それぞれの機能には、迅速性、正確性、安定性などが要求される。

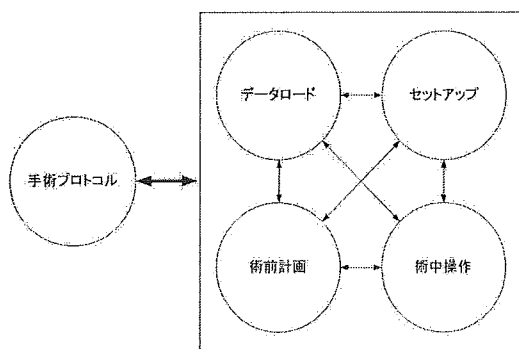


図8 手術支援ナビゲーションシステム状態遷移図

図8は、今回開発した手術支援ナビゲーションシステムの状態遷移図を示す。手術プロトコルは、今後、臨床研究などとタイアップして構築するとし、ここでは他の4つの機能について述べる。

- 1) データロード・・・X線診断装置、X線CT装置、MRI装置などの各モダリティの画像読込、レジストレーション情報（手術器具の画像空間と実空間との位置合わせ変換情報）やセンシング情報（位置・姿勢検出装置による手術器具を検出するための剛体情報）の読込、関心領域抽出データの読込
- 2) セットアップ・・・MRI装置や手術マニピュレータとの通信確立および動作チェック、ポインタツールの登録、レジストレーション処理
- 3) 術前計画・・・術前画像診断、関心領域抽出処理および抽出データ登録
- 4) 術中操作・・・内視鏡像および超音波画像の元画像・加工画像表示、術中画像による三断面およびガイド表示

手術支援ナビゲーションシステムの内、各種マルチモダリティ画像と内視鏡画像を重畳する方法について説明する。良く知られているように、軟性内視鏡のレンズは、狭い領域に装着されており、スペースが限られているので、視野の中心領域を拡大するため、周辺部ほどレンズの収差が大きくなる構造をとっている。したがって、内視鏡視野周辺部における画像の歪が大きく、臓器と内視鏡との距離が短い程、周辺部の歪みは顕著であり、臓器と内視鏡の距離に対し、画像の拡大率も一定ではないという問題がある。

一方、CT、MRI画像は、X線や磁場

を用いて被検者体内の臓器の情報を得て、臓器の構造やその形状を忠実に描出することを目的としており、前記内視鏡画像と比較すると、相対的に歪みが少ないと言える。

術者は、術中では、ほとんど内視鏡画像を注視していることが多いと考えられるので、X線CT装置やMRI画像を内視鏡の画像に重畳するのが望ましいと考えられる。

昨年度の報告書で述べているように、内視鏡の歪を補正する技術は確立できているので、X線CTやMRI画像を内視鏡の画像に重畳するために、X線CTやMRI画像を逆歪補正し、内視鏡画像に重畳した。

手術支援のナビゲーションシステムとして、重畳表示が術者にとって意義ある為には、内視鏡画像の領域では直接見えない領域における神経や血管の存在を事前に把握できるようにして、手術をより安全に、効果的に実施できるように支援することである。内視鏡画像との重畳表示によって、神経や血管、その他の重要器官が明瞭に区別し易く表示されていることが重要である。

図9は、管腔を模擬したファントムを内視鏡で観察した画像を(a)に示す。ファントムの管腔内に突起を設けてあるのが、良く観察できている。図(b)は、管腔ファントムをX線CT装置で撮影したものを、Virtual Endoscopyとして仮想内視鏡表示し、かつ、軟性内視鏡カメラの歪を逆補正して表示している。画像の輪郭が歪んで見えるのは、元のX線CT像を、カメラの収差で歪ませたせいである。この画像と実内視鏡画像を重畳させて画像が図(c)である。このままでは、内視鏡で見える範囲内の画像だけが表示できているが、内視鏡で視認できない領域をも観察できるようにするた

めに、内視鏡のカメラの歪関数を延長し、X線CT像を重畳したものが、図(d)である。明らかに、実内視鏡の周辺部も、X線CT像で確認できることが分かる。内視鏡だけでは視認不可能な臓器の正確な位置関係を直感的に把握できることになり、視認性の高い内視鏡外科手術が期待できる。

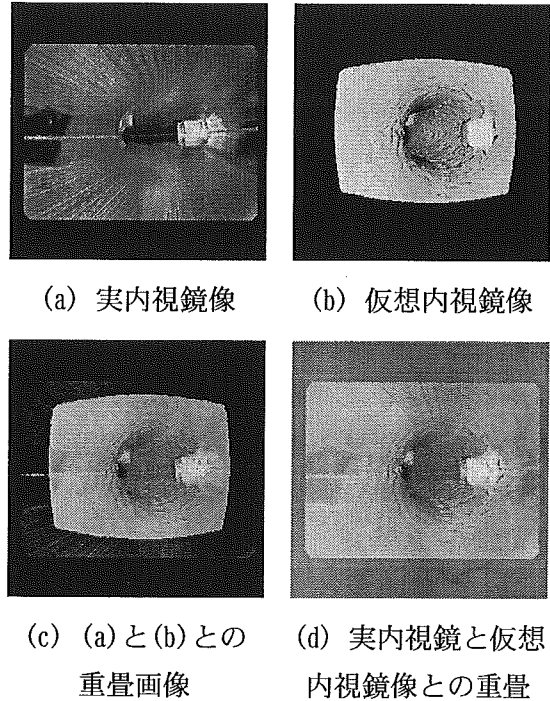


図9 画像重畳例

[III]術前、術中の手術支援の一つとして、病変の輪郭抽出法を開発したので、報告する。開発した手法は SNAKES と呼ばれる動的輪郭法 (Active Contour Model) を応用したものである。この手法は、簡単に言うと、曲線が画像の中のエッジに引き付けられるようにエネルギー関数を導入し、力学のアナロジーからエネルギーが小さくなるように曲線を動かして輪郭を抽出する方法である。SNAKES を表す変数として区間 $[0,1]$ 上で定義されるパラメータ s を導入する。

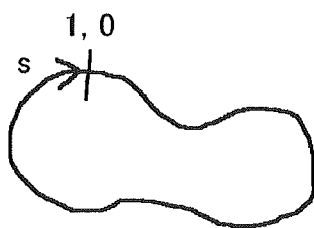


図 10 パラメータ s の定義

輪郭線上の全ての座標は、このパラメータ s によって決定される。すなわち、輪郭線上の任意の点の座標 v は式 (1) のように表される：

$$v = v(s) \quad (1)$$

ここで、SNAKES の内部エネルギー ε_{inter} を式 (2) のように定義する：

$$\varepsilon_{inter}(s) = \frac{\alpha}{2} \left| \frac{dv(s)}{ds} \right|^2 + \frac{\beta}{2} \left| \frac{d^2v(s)}{ds^2} \right|^2 \quad (2)$$

ここで、 α 、 β は、正定値のフリーパラメータであり、経験則に則って決める。右辺第 1 項は、SNAKES 上の隣接した 2 点間の距離に比例したエネルギーを表しており、SNAKES の収縮性に対応する。右辺第 2 項は、SNAKES 上の隣接した 2 点間の位置差分ベクトルの差分の二乗に比例したエネルギーであるので、その 3 点が直線からどれだけずれているかを表し、SNAKES の直線性に対応する。

次に、輪郭抽出のために、画像の輝度勾配が大きいところでエネルギーが小さくなるような画像エネルギー $\varepsilon_{imag}(s)$ を、式 (3) のように表わす。

$$\varepsilon_{imag}(s) = -\omega |\nabla I(v(s))|^2 \quad (3)$$

ただし、 ∇ は v による微分であり、 I は座標 v における画像輝度である。ここで、 ω は、正定値のフリーパラメータであり、経験則に則って決める。これより、画像エネルギーは最大値がゼロ値であり、輝度勾配が大きくなればなるほど値が小さくなることが理解できる。

輪郭線に不自然な凹凸が発生すると内部エネルギーが大きな状態になりうるので、これを押さえるために、外部から与える拘束のエネルギーを $\varepsilon_{exter}^{(pressure)}(s)$ とし、式 (4) のように与える。

$$\varepsilon_{exter}^{(pressure)}(s) = \frac{\eta}{2} |v(s) - v_{c.m.}|^2 \quad (4)$$

ここで、 η は、圧力ポテンシャルのフリーパラメータであり、経験則に則って決める。 $v_{c.m.}$ は収束先を示す座標であり、通常は輪郭線の重心が用いられる。これにより、輪郭線上の各点はその重心に向かって距離に比例した圧力を感じるようになる。これにより、全エネルギーの増加を抑え、凹凸のある対象も抽出可能となる。

さらに、輪郭線が形成する閉領域の面積が大きいほど輪郭線に内向きの力を発生させる面積力ポテンシャルエネルギーを定義する。このポテンシャルエネルギー導入の目的は、凹領域に輪郭線を浸入させることである。面積項 $\varepsilon_{exter}^{(area)}(s)$ は、式 (5) で表わされる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{exter}^{(area)}(s) &= \frac{\kappa}{2} \left\{ y(s) \frac{dx(s)}{ds} - x(s) \frac{dy(s)}{ds} \right\} \\ &= -\frac{\kappa}{2} \varepsilon_{jk} v_j(s) \frac{dv_k(s)}{ds} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{where } \varepsilon_{12} &= -\varepsilon_{21} = 1 \\ \varepsilon_{11} &= \varepsilon_{22} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 κ は、面積力ポテンシャルの大きさを決めるフリーパラメータであり、経験則に則って決める。また、 ε_{jk} は、Levi-Civitaの完全反対称テンソルである。ただし、ここでは、輪郭線上の点を表わすパラメータ s は、時計回りの方向に定義する。

以上から、全エネルギー $\varepsilon_{total}(s)$ は、式(6)で与えられる。

$$\varepsilon_{total}(s) = \varepsilon_{inter}(s) + \varepsilon_{imag}(s) + \varepsilon_{exter}(s) \quad (6)$$

SNAKESでは、式(6)を小さくするように曲線を逐次変形する方法を用いる。系の全エネルギー E_{total} は式(7)で表わされる。

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_{total}[v(s)] \\ &= \int ds \varepsilon_{total}(s) \\ &= \int ds \varepsilon_{total}(v(s)) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、系の全エネルギー E_{total} は、位置 v の汎関数であり、最小作用原理により、この場合の安定解は位置 v による変分をとることによって導かれる。

最終的には、変分から式(8)の非線形連立微分方程式が得られる。

$$\begin{cases} -\alpha \frac{d^2 x(s)}{ds^2} + \beta \frac{d^4 x(s)}{ds^4} \\ + \eta(x(s) - x_{c.m.}) - \kappa \frac{dy(s)}{ds} = \omega F_x(v(s)) \\ -\alpha \frac{d^2 y(s)}{ds^2} + \beta \frac{d^4 y(s)}{ds^4} \\ + \eta(y(s) - y_{c.m.}) + \kappa \frac{dx(s)}{ds} = \omega F_y(v(s)) \\ \text{where } F_i(v(s)) = \nabla_i |\nabla I(v(s))|^2 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)において、左辺は輪郭線を内側に引き

寄せる力として働き、右辺は画像のエッジ部分から受ける外向きの力である。求めるべき静的安定解は、この2つの力がつりあった場所に定まる。式(7)をSNAKESが形作るすべての点について解けば、静的安定解が得られる。

しかし、現実には、以下に示すような問題点がある。第一に、輪郭線上のすべての点をトレースするので、ノイズに対して脆弱である。第二に閉曲線が包んだ領域の内部情報が反映されない。閉領域内に抽出対象が複数存在しても、閉領域が複数に分裂することはない。第三に、画像エネルギー以外は外向きの力が発生しないので、対象のエッジを越えて閉曲線が内部に入ると、元に戻れないということが挙げられる。

以上のような問題点を解決するために、下記のような対策を施した。

第一の問題点に関しては、輪郭線にある程度幅を持たせることで、ノイズに対して弱いことを克服した。第二の点に関しては、閉曲線の内部の統計量を加味して、式(8)を解くようにした。また、第三の点に関しては、輪郭線上の各点を局所の領域に分け、局所の情報からパラメータ制御により、局所に膨張したり、収縮したりするメカニズムを取り入れたので、ある一定方向に同時に収縮または膨張しかしないという欠点を改良した。

今回開発した処理結果の一例を示す。図11は、腹部に病変を持つ患者のMRI画像に手書きで初期の閉領域をマウスなどのポインティングデバイスで書き込んだ領域を赤色で示す。この初期領域を初期値として、今回開発したSNAKESを適用し、領域抽出した結果が図12である。青色の領域が抽出さ

れた結果である。SNAKES が、病変部のエッジ領域を適切に抽出できていることが明確に理解できる。

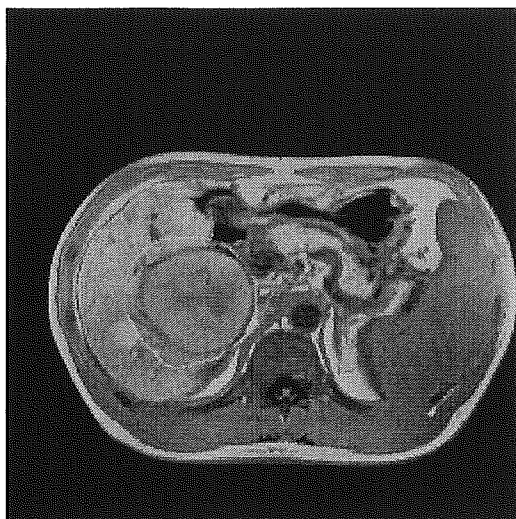


図 11 初期閉領域 (赤色)

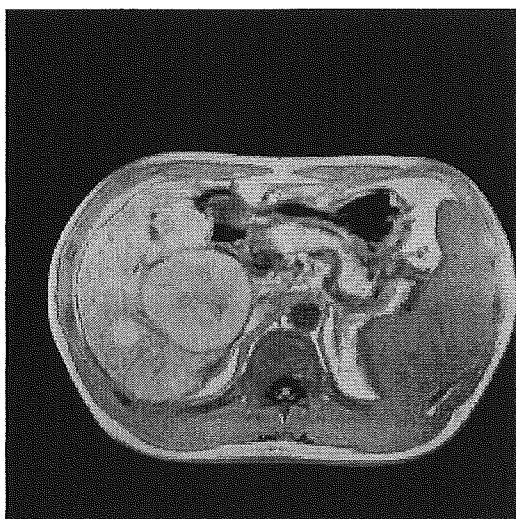


図 12 領域抽出判定結果 (青色)

この手法を、術前や術中に使用することで、医師の病変の取り残しなどの判定が簡易に出来ると思われる。今後、医師の指導を得て、臨床適用の際の問題点の抽出などを実施し、より良く臨床に使用できるものに仕上げたいと考えている。

D. 考察

[I] 手術室環境において、今回設置予定の X 線画像診断装置、自走式 CT 装置およびオープン型 MRI 装置を配置した際に考えられうる問題点の内、①外来電磁波ノイズ対策、②前述の画像診断装置が発生する干渉電磁波ノイズ対策、③オープン型 MRI 装置の発生する漏洩磁場対策、④手術室の高耐床荷重対策、⑤高質量の画像機器の搬入方法、搬入経路などを検討し、設計に反映させた。

例えば、オープン型 MRI 装置は質量が 15 トン強あるので、国立がんセンター中央病院 9 階の手術室フロアの大梁に、設置する MRI の 3 本の脚部の内 2 本を配置し、残りの脚部 1 本を、元の躯体の小梁を補強するために鉄骨を配置して荷重を耐えられるレベルとした。

また、自走式 CT 装置のレール部分の補強や FPD-DR 装置の C アーム部の天井吊り部も、上部の補強鉄骨を配置し、地震等外力が働いても大丈夫な構造とした。

[II] コンピュータを用いたロボット外科手術は、術野が狭い、鉗子の動きが制限される等の問題を打開し、より安全で確実な手術を可能とする画像処理技術を開発した。外科手術ロボットの代表例として、Intuitive Surgical Inc 社の da Vinci[®][1] や ZEUS[®][2] が挙げられ、低侵襲手術や遠隔手術のツールとして臨床応用されてきた。しかし、da Vinci[®] や ZEUS[®] では術者と内視鏡手術ロボットとのインタフェースがマスタースレーブ方式であるため、術者の動きを忠実に再現している反面、不用意な操作により臓器を傷つけることが考えられる。また、画像誘導システムと統合されていないため、アプローチしにくい部位へ術具を

誘導することや内視鏡像だけでは視認しにくい部位を可視化することが困難である。その解決方法の一つとして、内視鏡と医用診断画像装置を併用した術中ガイドイメージング技術が考えられる。この術中ガイドイメージング技術を実現するための手術支援基盤システムの要素機能開発を今年度実施した。

想定している具体的な各種手術の場面では、軟性内視鏡で、術野の中心部を確認しながら手術処置を実施し、周辺部の状況確認に、X線CT装置、MRI装置で撮像した3次元画像などを軟性内視鏡画像と重畳することで、手術の安全性を高め、正確で、効果的な手術を実現しようと考えている。このような画像支援を用いると、従来難しかった深部、狭小部、臓器の背後など直視できない領域の手術を可能にすると思われる。

今年度は、特に手術支援基盤システムにおいて中核をなす手術支援ナビゲーションシステムを中心に開発した。

〔III〕手術支援基盤システムの中核部分を担う手術支援ナビゲーションシステムにおいて、術前や術中において、対象となる病変部を迅速に識別、領域抽出する機能を開発した。病変部の領域抽出機能は、大別すると①X線CTやMRI画像における病変の輝度変化を利用するもの、②病変部のエッジ情報を利用するもの、に分けられる。しかし、病変部の輝度変化を利用して病変の領域抽出する方法は、ノイズの影響を受けやすく、また、輝度閾値により抽出領域の輪郭を誤抽出する場合がある。

一方、今回開発した病変のエッジ情報を利用した方法は、輝度変化による方法では

捕らえにくい病変部領域も抽出でき、安定的に病変部の領域を抽出できた。もちろん、初期値として適当な閉領域を与えた後、重心を支点として角度をある程度量子化した方向での病変部の輪郭を抽出する手法をとる。常に、病変部を取り囲んだ閉領域が、局所的に、拡大・縮小を繰り返して、病変部を適切に囲んだ段階で終了する手法である。具体的に、X線CTやMRI画像のT1強調像やT2強調像における脳病変や腹部の病変に適用し、病変の輪郭をほぼ正確に抽出できた。

E. 結論

〔I〕今回の手術室環境構築の研究において、手術室内に設置して、手術支援を実施する画像診断支援機器相互の干渉問題を解決することが今回の重要課題となった。特に、①外来電磁波ノイズ遮蔽対策、②X線画像診断装置、自走式CT装置などが内部に装備する電子機器類から放射するRF電磁波などが引き起こす電磁波ノイズの相互干渉を緩和するための対策及び外部に漏洩させないための対策、特に低漏洩電磁波対策、③MRIの静磁場発生装置の漏洩磁場対策、④手術室環境の高耐床荷重対策、⑤質量の大きな画像診断装置の搬入経路、搬入方法、⑥手術室のクリーンレベルを保つための空調設備などを検討し、昨年度から今年度を通して完成させた国立がんセンター中央病院9階手術室フロアに、あらたな手術室を構築した。

今回の手術室構築の検討過程において、各種画像診断機器をRF電磁波シールドされた室内に設置することが非常に困難であることが明らかとなった。

オープン型MRI装置には、元来撮像室内に引き込む各種信号線や傾斜磁場電源などを、すべてラインフィルタを通して供給する方策が確立している。この方法に従い、同じ室内にX線画像診断装置やX線CT装置を設置すると、これらの電力線、信号線、制御線もすべてラインフィルタを経由して手術室内に供給する必要がある。しかしながら、これらの電力線、信号線、制御線は数百本にも達するものであり、これらをすべて動作確認して、機能や性能を保証し、安定性や信頼性を確保することは現実的ではない。

そこで、今回はX線画像診断装置とX線CT装置が同一の場所に設置されるので、これらをMRI撮像のためのRFシールドルームの外部に設置することとし、ラインフィルタの設置を不要とした。ただし、ここで手術室の有効利用のため、MRI室とX線画像診断装置およびX線CT装置とを同室に設置して使用することを想定するため、両者の間にRFシールドカーテンを用いて、MRI撮像時はカーテンを引き、X線画像診断装置あるいはX線CT装置を使用する際はカーテンを開くことで手術室の有効利用を考えた。

[II]手術支援基盤システムの開発に関して下記の結論を得た。

手術用支援ナビゲーションシステムとして、内視鏡画像、X線診断装置、X線CT装置、MRI装置など医用診断画像を取得する機能、内視鏡の先端位置・姿勢を専心具する機能、マルチモダリティ画像共用データベース、画像解析及び画像表示機能、可撓型内視鏡を駆動するためのアクチュエータ機能、可撓型内視鏡マニピュレータを

操作するための操作入力機能、などを想定したシステムアーキテクチャを構築した。

手術支援ナビゲーションシステムには、昨年度開発した内視鏡歪補正技術を利用し、X線CT画像やMRI画像を内視鏡像の歪に合わせて逆補正する技術を搭載し、重畳することに成功した。

[III]手術支援ナビゲーションシステムにおいて、術前や術中において、対象となる病変部を迅速に識別することが重要である。そのため、簡便に病変の領域を自動的に抽出する機能を開発した。開発した機能は、X線CTやMRI画像における病変の輝度変化を利用するものではなく、エッジ情報を利用して閉領域となる病変部を囲う手法であり、具体的に脳病変や腹部の病変に適用し、病変のエッジをほぼ正確に抽出することに成功した。

G. 研究発表

1. 論文発表

本年度は該当なし。

2. 学会発表

本年度は該当なし。

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

1)特願 2005-346166、発明の名称：医用診断・治療室、発明者：渡部滋、牧野英一、中村行宏、垣添忠生、小林寿光

2)特願 2005-362332、発明の名称：画像表示方法、プログラム、及び装置、発明者：谷口拓樹、垣添忠生、小林寿光

3)特願 2006-028964、発明の名称：電

磁波シールド装置、発明者：垣添忠生、小林寿光、渡部滋、中村行宏、寺川隆成

4)特願 2006-051870、発明の名称：「MRI装置の漏洩磁場範囲表示装置」、発明者：垣添忠生、小林寿光、渡部滋、牧野英一

5)特願 2006-066317、発明の名称：「手術室用患者移送装置」、発明者：垣添忠生、小林寿光、渡部滋、牧野英一

2. 実用新案登録

本年度は該当なし。

3. その他

本年度は該当なし。

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の 編集者名	書 籍 名	出版社名	出版地	出版年	ページ
<u>橋爪誠</u>	3.医療ロボットの臨床応用 3.1 腹部手術への応用.	山根隆志	医療機器と再生医療 -開発最前線と今後の動向-	株式会社情報機構	東京	2005	121-130
<u>土田敬明</u>	経気管支生検.	加藤治文、ほか	肺癌の臨床	篠原出版社	東京	2006	137-143
<u>木下貴之</u>	手術：センチネルリンパ節生検法	福富隆志	乳癌診療ハンドブック	中外出版	東京	2005	124-134

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
<u>Kobayashi T</u> , <u>Tsuchida T</u> , <u>Kakizoe T</u> , et al.	A flexible endoscopic surgical system: First report on a conceptual design of the system validated by experiments.	Jpn J Clin Oncol	35(11)	667-671	2005
<u>Nakagawa T</u> , <u>Kakizoe T</u> , et al.	DNA hypomethylation on pericentromeric satellite regions significantly correlates with loss of heterozygosity on chromosome 9 in urothelial carcinomas.	J Urol	173	243-246	2005
<u>Yamanata H</u> , <u>Fujimoto H</u> , <u>Kakizoe T</u> , et al.	Effectiveness of adjuvant intermittent endocrine therapy following neoadjuvant endocrine therapy and external beam radiation therapy in men with locally advanced prostate cancer.	The Prostate	63	56-64	2005
<u>Ichihara T</u> , <u>Kakizoe T</u> , et al.	Lack of chemoprevention or promotion effects of docosahexaenoic acid on small intestine, colon, liver, lung, thyroid, esophagus, kidney, and forestomach carcinogenesis in a rat medium-term multi-organ carcinogenesis model.	J Thoxicol Pathol	18	53-59	2005
<u>Hamaguchi T</u> , <u>Matsumura Y</u> , <u>Kakizoe T</u> , et al.	NK105, a paclitaxel-incorporating micellar nanoparticle formulation, can extend in vivo antitumour activity and reduce the neurotoxicity of paclitaxel.	Bri J Cancer	92	1240-1246	2005
<u>Nakagawa T</u> , <u>Kakizoe T</u> , et al.	DNA hypermethylation on multiple CpG islands associated with increased DNA methyltransferase DNMT1 protein expression during multistage urothelial carcinogenesis.	J Urol	173	1767-1771	2005
<u>Chihara Y</u> , <u>Fujimoto H</u> , <u>Kakizoe T</u> , et al.	Loss of blood group A antigen expression in bladder cancer caused by allelic loss and/or methylation of the ABO gene.	Lab Invest	85	895-907	2005

Ishikawa H, <u>Kakizoe T</u> , et al.	Randomized trial of dietary fiber and lactobacillus casei administration for prevention of colorectal tumors.	Int J Cancer	116	762-767	2005
Uchino H, <u>Matsumura Y</u> , <u>Kakizoe T</u> , et al.	Cisplatin-incorporating polymeric micelles (NC-6004) can reduce nephrotoxicity and neurotoxicity of cisplatin in rats.	Bri J Cancer	93	678-687	2005
Uchida T, <u>Fujimoto H</u> , <u>Kakizoe T</u> , et al.	Transrectal high-intensity focused ultrasound in the treatment of localized prostate cancer: a multicenter study.	Acta Urol Jpn	51	651-658	2005
Matsushita H, <u>Matsumura Y</u> , <u>Kakizoe T</u> , et al.	A new method for isolating colonocytes from naturally evacuated feces and its clinical application to colorectal cancer diagnosis.	Gastroenterology	129(6)	1919-1927	2005
Pu YS, <u>Fujimoto H</u> , <u>Kakizoe T</u> , et al.	The 18th international symposium: controversies in prostate cancer diagnosis and treatment.	Jpn J Clin Oncol	35(11)	680-689	2005
Yamada D, <u>Kakizoe T</u> , et al.	Promoter hypermethylation of the potential tumor suppressor DAL-1/4.1B gene in renal clear cell carcinoma.	Int J Cancer	118	916-923	2006
野村和弘	悪性脳腫瘍治療の新しい展開 診断と治療の変遷.	癌と化学療法	32(4)	432-436	2005
野村和弘	脳腫瘍の診断と治療—最近の研究動向— 脳腫瘍取り扱い規約の概要.	日本臨床	63(9)	195-203	2005
<u>Kobayashi T</u> , <u>Tsuchida T</u> , <u>Kakizoe T</u> , et al.	A flexible endoscopic surgical system: First report on a conceptual design of the system validated by experiments.	Jpn J Clin Oncol	35(11)	667-671	2005
Nomori H, <u>Kobayashi T</u> , et al.	¹¹ C-Acetate positron emission tomography imaging for lung adenocarcinoma 1 to 3 cm in size with ground-grass opacity images on computed tomography.	Ann Thorac Surg	80	2020-2025	2005
Iinuma G, <u>Kobayashi T</u> , et al.	Recent advances in radiology for the diagnosis of gastric carcinoma.	Divers Gastric Carcinoma		221-232	2005
Iinuma G, <u>Kobayashi T</u> , et al	Vascular virtual endoluminal visualization of invasive colorectal cancer on MDCT colonography.	Am J Roentgenol	184	1194-1198	2005
小林寿光, <u>土田敬明</u> , ほか	肺腫瘍のCTガイド下気管支鏡検査.	からだの科学増刊「高度先進医療」		13-16	2005
菅原明彦, <u>小林寿光</u> , <u>土田敬明</u> , ほか	CTガイド下極細径気管支鏡検査.	呼吸器科	8(3)	266-272	2005
Suzuki T, <u>Sakuma I</u> , et al.	Improvement of compact forceps manipulator using friction wheel mechanism.	J Jpn Soc Comput Aided Surg	7(2)	138-141	2005
Aoki E, <u>Hashizume M</u> , <u>Sakuma I</u> , et al.	Design and evaluation of a master-slave system with portability and flexibility of setting.	J Jpn Soc Comput Aided Surg	7(2)	215-217	2005

<u>Noghichi M, Iseki H, Sakuma I, et al.</u>	Development of a compact automatic focusing system for a neurosurgical laser instrument.	J Jpn Soc Comput Aided Surg	7(2)	188-191	2005
<u>Suzuki T, Sakuma I, et al.</u>	Compact forceps manipulator for laparoscopic surgery.	Proc 2005 IEEE/RSJ Int Conf Intell Robot Syst	IROS2005	3732-3737	2005
<u>Suzuki T, Sakuma I, et al.</u>	Compact forceps manipulator using friction wheel mechanism and gimbals mechanism for laparoscopic surgery.	Proc 8 th Int Conf Med Image Comput Assist Interv	LNCS 3750	81-88	2005
<u>野口雅史, 伊関洋, 佐久間一郎, ほか</u>	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(4)	483-489	2005
<u>中村亮一, 佐久間一郎, 伊関洋, ほか</u>	脳腫瘍の最大摘出を実現するマイクロレーザ手術ロボットシステムの開発.	電気学会研究会資料	BMS-05-26~32	9-14	2005
<u>山下紘正, 佐久間一郎, 橋爪誠, 土肥健純, ほか</u>	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
<u>八木昭彦, 土肥健純, ほか</u>	スライダリンク機構及び空気圧を用いた可撓性外套管のための柔剛可変機構の基礎的検討.	第14回日本コンピュータ外科学会大会・第15回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集		129-130	2005
<u>小原太, 橋爪誠, 土肥健純, ほか</u>	MR対応型穿刺ロボットシステムにおけるナビゲーションの基礎的評価.	第14回日本コンピュータ外科学会大会・第15回コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集		213-214	2005
<u>坂部啓, 館暲, ほか</u>	再帰性投影技術におけるポイントインテリジェントデバイス.	日本バーチャルリアリティ学会大会論文集	10	173-176	2005
<u>園田哲理, 館暲, ほか</u>	頭部搭載型プロジェクタ (第9報) - フルオープン型 HMP「X'talVisor」の光学的特性 -.	日本バーチャルリアリティ学会大会論文集	10	239-240	2005
<u>Hashizume M</u>	Image-guided surgical robotic system for the future minimally invasive surgery.	J Jpn Soc Comput Aided Surg	7(2)	132	2005
<u>橋爪誠</u>	先端技術の外科学の応用 4. ロボット手術.	日本外科学会雑誌	106(11)	689-693	2005