

御エンジンに推論要求を発行する。ストーリー制御エンジンは、類似したストーリーを検索し、ストーリーを優先度順に並び替えてイベントビューワに転送する。

(2) データ構造、及び制御マネージャのアーキテクチャ設計

ストーリーはプロトコルの処理フローの一単位、プロトコルはオペレータが操作するアプリケーションクラスの一単位、タスクはアプリケーションの機能クラスの一単位である。タスクは制御パラメータ（データ、操作）から構成される。また、それぞれのクラスは、データの実体を示す情報や操作の実体を示す属性をもつ。

本件のデータ構造は、上記構成要素をノードとして構成したプロトコルオブジェクトモデル（POM：Protocol Object Model と記述）ツリーで表現した。POM ツリー上のノードを全てオブジェクトとして捉えた。Element オブジェクトは、要素（ストーリー、プロトコル、タスク、操作、データ）を表し、情報オブジェクトや属性オブジェクト

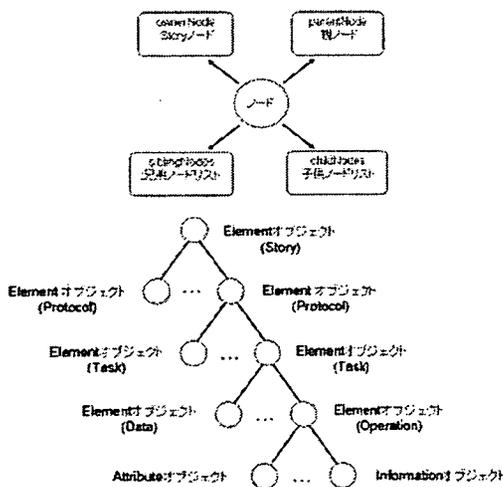


図 47 POM ノード構造

は、要素の内容を表した。ただし、情報オブジェクトや属性オブジェクトは、どのエレメントオブジェクトのノードにも成りえるとした。POM ツリーのルートとして Story オブジェクトがストーリーの全体を表した。POM ノードツリーのクラス図を図 48 に示す。

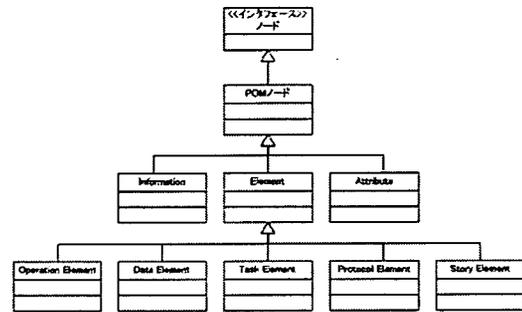


図 48 POM ノードクラス図

図 49、50 のようにプロトコル管理ツール、イベントビューワ、ナビゲーションビューワを管理できるようプロトコル制御マネージャを設計した。

- GUID 管理...プロトコル管理ツールからの GUID 発行要求により、プロトコルやタスクの GUID を発行する。
- ストーリー管理...プロトコル管理ツールでプロトコルやタスク、インターフェースをカスタマイズし、ストーリーを組立てて、ライブラリで管理する。また、ナビゲーションビューワで術中に操作したプロトコルから、ストーリーを構成し、ライブラリで管理する。
- 通信管理...ストーリー制御エンジンと通信し、ストーリーの検索・学習・抹消を行う。
- プロトコル管理...イベントビューワからのアプリ起動要求により、プロトコルを生成し、アプリケーションを起動

する。アプリ停止要求により、アプリケーションを停止する。また、ナビゲーションビューからアプリケーションを強制的に起動する。

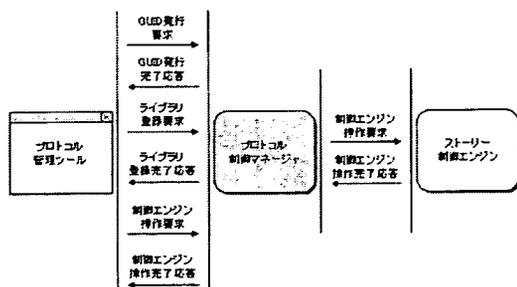


図 49 プロトコル管理ツールにおけるプロトコル制御マネージャの機能

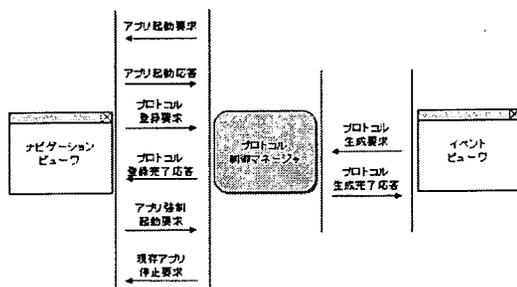


図 50 イベントビュー、ナビゲーションビューにおけるプロトコル制御マネージャの機能

### (3) 術具位置追従アプリケーションの実装

術具位置追従機能の動物実験への適用にあたり、事前に模擬実験で動作検証を行った。

手術ナビゲーションシステムにおけるターゲットの設定や術具位置のガイドに X 線 CT 画像 (ブタ) を使用した。なお、模擬実験であるため、位置合わせは行えないが、擬似的に三面図 MPR 画像及び 3D ガイド画像を表示した。内視鏡は、VNL1171K (ペンタックス社製) を使用した。模擬実験前に内視鏡レンズによる歪みを補正する歪補

正マップを算出した。

電子データとして発生させた仮想術具と、内視鏡 LIVE 映像の実術具とが重なり合う位置や方向を逐次検索し (マッチング処理)、実術具に最も一致する仮想術具から、実術具の三次元的な位置や方向を算出した。実術具に特徴的なマーカーを貼付することで、実術具とそれ以外とを区別し、マッチング処理の精度を高めた。また、実術具の長手方向の軸角もマーカーのパターンから算出した。

術具位置追従処理結果の一例を図 51 に示す。左図は実術具であり、処理過程で発生する術具方向に交線を付けた。右図は処理後の仮想術具であり、実術具に重畳表示された。これにより、実術具と仮想術具とのマッチングのずれを映像として確認することができた。また、図 52 のように三次元的な位置や方向を数値で示すこともできる。

図 53 にターゲット、及び親内視鏡位置設定画面を、図 54 に術具位置追従画面を示す。設定画面では、三面図 MPR 画像、及び 3D ガイド画像を用いて位置や方向、WW/WL 等を設定できた。術具追従画面では、処理結果に連動して位置や方向で切断された三面図 MPR 画像や 3D ガイド画像を正確に表示でき、内視鏡座標系での術具の三次元的な位置や仰角・方位角・軸角を数値化できた。



図 51 実術具 (左): 処理過程で発生する術具方向を赤線で表示、仮想術具 (右): 実術具との重畳表示

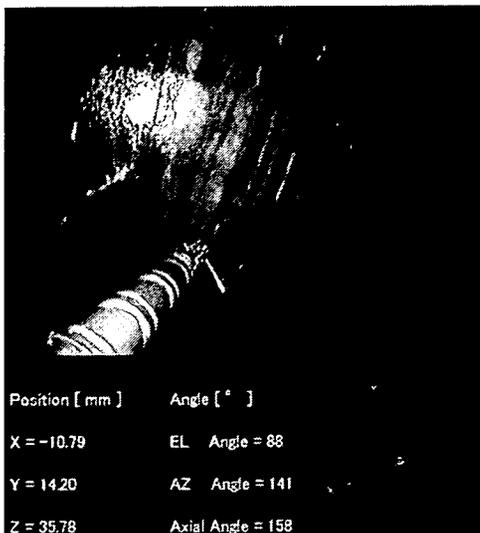


図 52 術具の三次元的位置や方向の表示

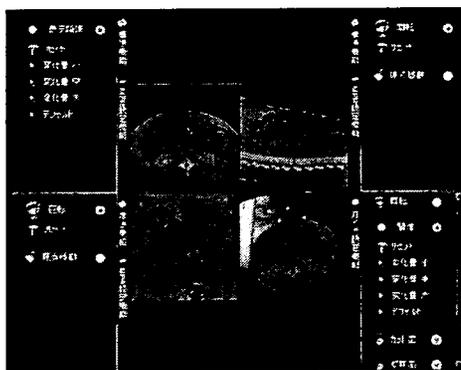


図 53 ターゲット、及び内視鏡位置設定画面

ブタを用いた動物実験では、模擬実験で使用した内視鏡から、ペンタックス製の親子内視鏡に変更した。親子内視鏡の内径は術具とほぼ同じである。術具を用いず、マーカーを子内視鏡に貼付したものをを用いた。ターゲットや親内視鏡の位置を模擬実験と同様に設定した。安定して術具位置を追従できなかったが、処理が成功した例を図 55 に示す。

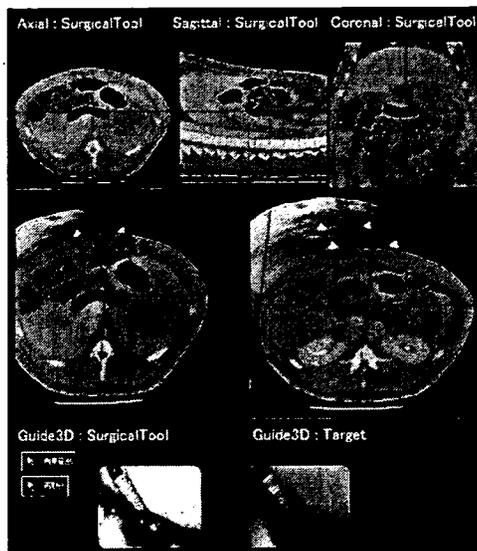


図 55 術具位置追従機能のブタ実験による動作検証結果

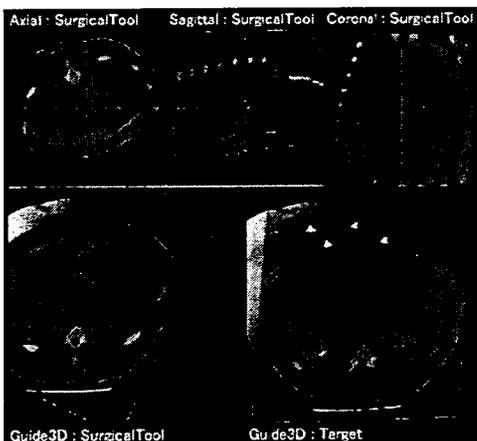


図 54 術具位置追従画面

#### (4) データ通信機能およびデータ蓄積・検索機能の改良

##### 《DICOMIF サーバの改良》

DICOMIF サーバは、手術ナビゲーションシステムや DICOM サーバから得られた手術関連情報をデータベースで管理する機能、Web Service 通信や Socket 通信を用いて手術ナビゲーションシステムと手術関連情報を送受信する機能を実装した。今回、新たに事例ベースによるストーリー制御エンジンを手術ナビゲーションシステムに組み込む

ために、以下の手術関連情報を転送できる  
ようインターフェースを大幅に追加・改変  
した。図 56 に手術関連情報を受信した一例  
を示す。画面上部は検査情報を、画面下部  
はカメラで撮影された LIVE 映像を表示し  
た。

#### 「手術関連情報」

- 患者情報...患者 ID、患者名、患者性別、  
血液型
- 検査情報...検査日、検査時刻、モダリ  
ティ、検査記述、検査番号
  - シリーズ情報...シリーズ番号、シ  
リーズ記述、検査部位、撮像体位
  - 画像情報...画像番号、フレームカ  
ウント、行、列
- 手術情報...手術日、手術時間、手術年  
齢、麻酔法、再発、輸血、診断、術式  
名称、診療科、スタッフ、装置、医薬  
品、手術体位、部位・臓器
  - スタッフ...執刀医、助手、麻酔医、  
臨床検査技師、放射線技師、看護  
師
  - 装置...モダリティ、映像機器、生  
体モニタリング、マーカー、ツ  
ール、術具、麻酔器具、その他
  - 医薬品...神経系、免疫系、炎症、  
感染症、悪性腫瘍、外科的手術、  
泌尿器系、その他
  - 位置...ツール、マーカー、レジス  
トレーション
  - モジュール...画像処理、計測、領  
域抽出、音声
  - LIVE...カメラ、医用画像、センシ  
ング、イベントレコーダー、生体  
信号

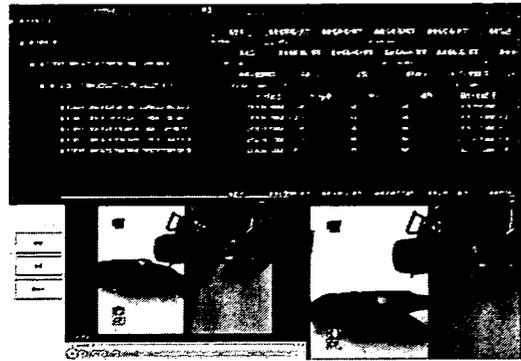


図 56 手術関連情報表示

#### 《StarFabric データ通信制御ソフトウェアの改良》

図 57 に本ソフトウェアのシステム構成  
図を示す。また、実装した各機能を以下に  
記載する。

#### ● StarFabric 制御機能

StarFabric の初期化、コネクション作成、  
ホットプラグによるノード検出などの  
StarFabric 固有の処理を行うための機能を  
実装した。StarFabric に接続されるノードは、  
ファブリックの初期化やファブリック内で  
発生したイベントを検出するノード (Root)  
と、それ以外のノード (Leaf) に分類され、  
一般的に Root ノードが StarFabric のコネク  
ションの作成やイベントの検出を一括で行  
った。本件では、ナビゲーションコントロ  
ール装置が常に存在するノードであること  
から、Root ノードとしての処理を行い、そ  
れ以外の装置は Leaf ノードとして処理を行  
なった。また、各装置にノード固有の ID(ノ  
ード ID)を付加し、各ノードの初期化時にノ  
ード ID を通知することにより、各ノードの  
種別判定を行った。なお、ノード数は最大  
で 8 ノード (Root ノード + Leaf ノード 7 台)  
とした。

StarFabric でデータ通信を行うには、コネクシオンを作成する必要がある。本件では、制御用コネクシオンとデータ通信に使用するデータ通信コネクシオン、及び複数のノードに同時にデータ転送するためのマルチキャストコネクシオンの 3 種類を作成した。制御コネクシオンは、各装置間で制御用データを通信するために使用するもので、各装置のノード情報とコネクシオン情報の通知に使用するものである。データ通信コネクシオン、及びマルチキャストコネクシオンは、各装置間で行うデータ転送に使用するものである。

- メモリ管理機能

StarFabric で通信を行う際に必要となる物理メモリの確保や、物理アドレスのユーザ空間へのマッピングなどの、通信する上で最低限必要なメモリ管理を行うための機能を実装した。

- 通信制御機能

StarFabric の Write Message Event 機能を使用し、装置間で割り込みベースのメッセージ通信を行うため機能、及び DMA 対応 StarFabric ボードを使用する場合の DMA 通信制御を行う機能を実装した。

- エラー検出機能

これまで開発してきたものと同様に、StarFabric 上のエラーを検出し、エラー発生時にユーザアプリケーションに対して通知を行うための機能、各ノードの動作状態を定期的に監視し、動作停止検出時にもユーザアプリケーションに対して通知を行うための機能を実装した。

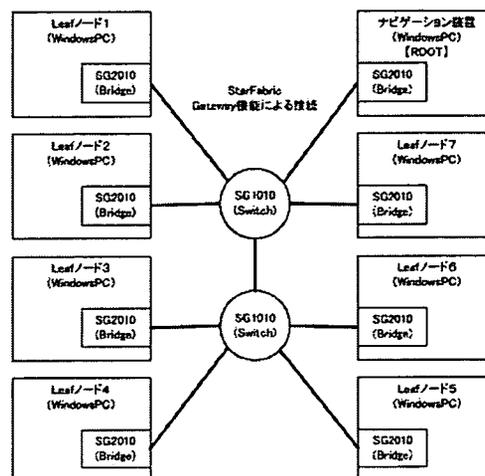


図 57 システム構成図

#### D. 考察

[I] 開発した手術器具吸引力評価装置は、電磁石を主たる構成物とし、数百 kg の重量があり 2.5kVA の電力も必要とする。したがって、MRI 装置を併置した手術室の入り口に設置して、簡便に持ち込み物の評価を行うものではない。持ち込み物のリスク分類を予め行うのに必要な、吸引力の定量的値を示すものである。持ち込み物を準備する段階で誤って別の器具類が混入する可能性もあり、その混入を防止するためには、定性的ではあるが、簡便な装置を手術室の近くに設けるのが良いと考えられる。

モニタ用シールドボックスは、シールドフィルムを 6 枚重ねることで、MRI 画像の画像ノイズが許容できる範囲となった。モニタ映像は、シールドフィルムがない場合に比べ、暗く、青みがかったが、白黒が主の MRI 画像では視認できるレベルにあると考える。シールド性能を向上させるため、帯状の銅箔をシールドボックス縁に貼り付け、フィルムの重ね合わせる際のフィルム同士の接触面積や、金属の筐体とフィルム

が面で接触するようシールドボックスに工夫を行ってきた。しかしながら、電磁波ノイズの発生源であるモニタについて、漏洩電磁波対策を施すことは実施しておらず、特にモニタ映像面に対するモニタ自身の電磁波ノイズ対策が必要と考える。

開発した無影灯は、装置に近づける照明及び支持土台部分と、照明ライトに電圧を印加する電源トランス部分を分離した装置で、照明及び支持土台部分は、非磁性材料で製作した。電源トランス部分は、非磁性化することが困難であるため、トランスの漏洩電磁波をシールドする筐体に格納し、かつ、電源コンセント付近に置いて使用されるようにケーブルの長さ、ワイヤーを備えた。また、万が一、筐体がMRI装置に近づいた場合でも、筐体内部にスペースを設けたことにより、強い吸引力の発生を低減する安全策を講じている。

このように、電源トランスについては、種々の安全策を講じているが、その完全な排除のためには、電源コンセントと同様に、無影灯専用の電源コンセントを壁面に設けるのが良いと考えられる。

### III] 位置センシング技術の要素技術開発に関し、

- (1) 超音波位置センシング要素技術開発
- (2) 内視鏡画像による術具位置センシング要素技術開発

について、考察をそれぞれ記載する。

#### (1) 超音波位置センシング要素技術開発

送信センサの単体実験の結果より、音速は1,499m/sec という値が得られた。この値は、20℃近傍での水での音速 1,500m/sec と

非常によく一致しており、送信センサと受信センサの時間同期は精度よく機能していることが推測できる。また、到達時間に関しても、80nsec の精度ではデータよる違いが見られなかったことから再現性の高いことが確認できた。

複数の送信センサを用いた実験では、受信センサのおおよその位置の検出は可能であることを示すことができた。ただし、位置センサとして機能させるためには、数値的に三次元位置を算出できるようにする必要があり、計測誤差があることを前提としたロバストな処理手法の開発が課題となる。

今回実施した実験では、音速が一定である一様媒質に近い理想環境での評価のみを行った。構造物が存在し局所的に音速の異なる領域がある場合には、当然ながらセンシングの精度は低下する。しかし、体腔内で位置センシングをする場合を想定すると、主要な生体組織での音速は、図 58 に示すように、骨と空気層を除けば 10%未満の違いしかない。したがって、超音波信号の散乱や屈折により生じる偽信号の分別ができれば、少なくとも 2~3cm の精度を保証することは可能であると考えられる。また、複数の送信センサを用いて計測処理を行うので、各

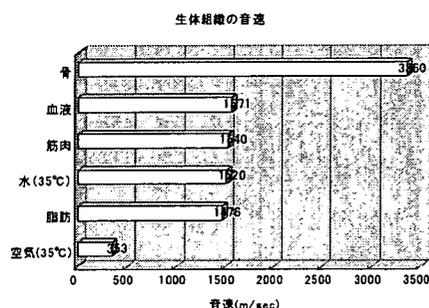


図 58 生体組織の音速

計測データを総合的に処理することにより、精度を向上することも期待できる。しかし、数 MHz の超音波は空気層ではすぐに減衰してしまうため、数十～数百 kHz の超音波の併用などの解決手段を検討すべきである。

## (2) 内視鏡画像による術具位置センシング要素技術開発

平均相互情報量を用いた手法の精度評価実験では、平均相互情報量の最大値をきちんと検出できるのであれば、位置の誤差は 1mm 程度、角度の誤差は術具の方向（回転軸 1,2）については 2deg 程度、術具の軸周り（回転軸 3）については 5deg 程度であることがわかった。したがって、本手法の原理的な有用性を確認することができた。

総合的な処理速度を向上するために導入した、実術具側面の二つのエッジを用いた自由度限定化処理に関しては、概ね良好な結果が得られた。

この前処理と平均相互情報量を用いた手法による術具位置センシング手法については、多くの場合に術具の大体の位置・姿勢を検出することに成功したが、精度が低下している場合や、異なる位置を検出した場合もあった。これらの原因としては、次のことが考えられる。

- a) 平均相互情報量に関する局所的最大値の問題
- b) 平均相互情報量に関する重みの問題
- c) 平均相互情報量を用いた手法の原理的な問題
- d) マーカーパターンの問題

a)は、平均相互情報量の最大値探索を行う際に、局所的な最大値に陥ってしまう可

能性があるという問題である。解決するためには、探索アルゴリズムに最大値に至った際に、局所的最大値かどうかを判定する処理を追加する必要がある。

b)は、平均相互情報量を算出する際に、術具の先端部分と手前部分では重みが異なるという問題である。術具の先端部分に近くなるにしたがって画像上での見かけの大きさは小さくなる。平均相互情報量はヒストグラムから算出する量であるから、術具の先端部分の情報量は手前部分の情報量と比較して少なくなっている。結果、術具の手前部分は一致するが、先端部分の一致度が低下する可能性がある。

c)は、平均相互情報量はヒストグラムから算出する量であるため、局所的な量ではなく大域的な量であることに起因する。大域的な量であるため、二つの画像が部分的に一致していなかったとしても、例えば、術具に血液が付着し見えていなかったとしても、処理が可能である。しかし、大域的な量であるが故に、画像上の構造物を直接認識しているわけではなく、ヒストグラムのパターンが一致してさえいれば、全く関係のない位置で平均相互情報量が最大となる可能性がある。これが原因であると推測される現象も数例確認できた。

d)は、術具に貼り付けたマーカーパターンのデザインに関する問題である。今回使用したマーカーパターンは、術具長手方向に同じパターンが三回繰り返しているものであった。実術具の一部が見えなくても、三つあるパターンのうち、残されたどれかを検出できれば良いと考えたためである。しかし、同じパターンが並んでいるため、パターンが一段ずれた位置で平均相互情報

量が最大となってしまう可能性がある。したがって、マーカーパターンのデザインを再検討する必要がある。

実際の術具位置センシング処理の結果より、術具の方向を指定する角度に関しては、値がずれると実術具と仮想術具の画像上での形状に差異が生じ、平均相互情報量が急激に小さくなるので、分解能は比較的高いことがわかる。しかし、術具軸周りの角度に関して、顕著な精度低下が見られた。この値がずれたとしても、術具の全体的な形状は変わらず、術具の領域の配色が多少変わるのみであるから、平均相互情報量はあまり大きく変わらない。結果、この角度に対する分解能は他の角度と比較してそれほど高くないと推察できる。処理速度に関しては、現状では1.5min程度の時間を要しており、リアルタイムでのセンシングは

実現できていない。処理アルゴリズムの見直しを行い、更なる高速化を目指す必要がある。

【III】 手術ナビゲーションシステムの要素技術開発に関し、

- (1) ストーリー制御エンジンの開発
- (2) データ構造、及び制御マネージャのアーキテクチャ設計
- (3) 術具位置追従アプリケーションの実装
- (4) データ蓄積・検索機能、及びデータ通信機能の改良

について、考察をそれぞれ記載する。

(1) ストーリー制御エンジンの開発

図 59 のようにシナリオに基づいて、動作確認と入力効率の計測を行った。動作確認



図 59 ストーリー制御エンジン動作検証結果一例

では、診療科、術者、病名、モダリティ、部位、手技などを項目としてシナリオを作成した。例えば、診療科を産科・婦人科から循環器内科に指定すると、産科・婦人科のメニューから循環器内科のメニューに最適化された。加えて、病名を「下肢動脈閉塞」に指定すると、モダリティなどの項目が最適化された。同様に、29のシナリオに対してストーリー制御エンジンの有無で動作実験を行ったところ、ストーリー制御エンジンを用いた場合と用いなかった場合で平均入力時間はそれぞれ21秒、103秒となり、約5倍の入力効率が向上した。

ストーリー制御エンジンは、ストーリーの順序を決定する機能であり、最終的なプロトコル決定はオペレータに委ねられる。ただし、ストーリーの進行を促し、最適なルートを指し示すことにより、手術進捗状況に応じた手術ナビゲーション機能をカスタマイズし、操作性を向上させることができる。

その他、以下のメリットが考えられる。

- 手術関連情報を設定することにより、装置セットアップの補助が行える。
- 術中で手術関連情報を変更することにより、ナビゲーション機能を柔軟に変更できる。
- 術式毎やユーザ特有のインターフェースへ拡張できる。
- 極めて詳細にカスタマイズされたマスターファイルが、自動的もしくは半自動的に作成できる。
- これまで十分に継承されなかったエキスパートと呼ばれる術者や手術スタッフのノウハウや知識を蓄え、利用し、再学習することができ、最適な手術プ

ロトコルを導き出すことができる。

したがって、ストーリー制御エンジンは、手術ナビゲーションシステムの支援ばかりでなく、図60のように手術全体を支援するものに拡張可能であると考えられる。これは、手術ナビゲーションシステムの情報ばかりでなく、生体モニタリングの情報、手術スタッフに対するエキスパートの助言、などを含めて手術全体を支援する一例である。

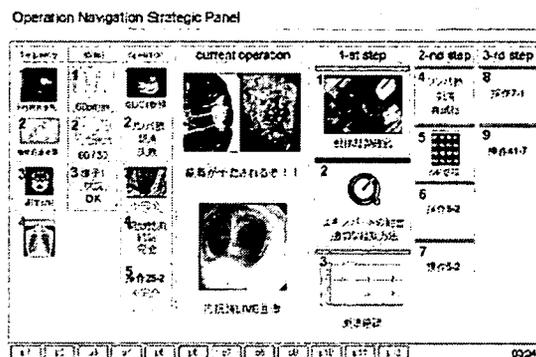


図60 ストーリー制御エンジン使用例

## (2) データ構造、及び制御マネージャのアーキテクチャ設計

本件のデータ構造は、ストーリー、プロトコル、タスク、制御パラメータ（データ、操作、情報、属性）からなる要素をノードとして構成し、プロトコルオブジェクトモデル（POM：Protocol Object Model）ツリーで表現したものである。ノードはルートノード、親ノード、兄弟ノード、子供ノードからなり、上記構成要素を容易に変更・追加・削除できる構造である。つまり、このデータ構造からなるストーリーは、術中に手術関連情報が変更された場合でも、ナビゲーション機能を柔軟に変更することや、術式やユーザ特有のインターフェースへ拡張

張ることが容易である。柔軟に機能変更されたオブジェクトの集合は、一見すると関連性のない、乱雑なオブジェクトの集合ではあるが、ストーリー制御エンジンでその関連性を管理することにより、極めてデータ効率の良い集合へと変化する。また、機能追加によるルール変更の開発工数を軽減でき、開発者にとってもメリットが高いと思われる。

また、それぞれのノードが兄弟ノードリストや子供ノードリストを持っていることから、ストーリーの中で現在のノードが手術全体のどの段階であるかを確認することが可能であり、進行状況を知る手がかりとなる。その他、アプリケーションを機能限定することが可能となり、操作簡便性の向上や誤操作低減による安定性の向上が見込まれる。

### (3) 術具位置追従アプリケーションの実装

ブタを用いた動物実験では、術具追従処理が成功することはあったが、安定して成功するレベルに至らなかった。原因として、内視鏡映像に表示されている文字のエッジが強いことや、内視鏡映像の背景（黒色の外枠）とマーカーとの境界に強いエッジがあることで、術具のエッジを正確に捉えきれなかったためであった。また、マーカーのつなぎ目の特徴が処理に影響する点や、親内視鏡の仕様が不明な点が挙げられる。画像の特徴量に起因するものに関して、文字を消去する、マーカーサイズを変更する、内視鏡映像の背景窓は処理対象外とするなど、工夫をすれば回避できる問題である。しかし、内視鏡の仕様に起因するものに関して、仮想術具が実際の術具と合致するよ

うに発生させたデータであるため、子内視鏡のサイズが術具と少しでも異なれば、マッチングする位置や方向に影響する。また、内視鏡の内部パラメータ（画角、イメージャサイズ、焦点距離）や内視鏡レンズによる歪曲収差を考慮して仮想術具を発生させているため、マッチング対象が変わってしまえば位置精度が低下する。この点から、本方法では厳密に処理するために内視鏡毎の内部仕様を公開データだけでなく、事前実験により精確に計測する必要がある。

処理速度の面では、理想として 0.1 秒程度の処理速度が必要である。今回、処理方法の妥当性を検証するため、処理時間より位置精度を重要視した。また、実験から常に処理を行っている必要はなく、必要なときだけ処理が行われればよいことがわかった。今後、高速化を図るためには、多段で処理を行い、徐々にマッチングの算出精度を高める方法やフレーム間の情報を利用する方法が考えられる。

算出精度に関して、位置精度は 1mm 程度、角度精度は 5deg 程度が必要である。今回、マッチングの際、仮想術具と実術具との平均相互情報量を用いた。その平均相互情報量のピークが急峻なため、位置や角度の振り幅を小さくせざるを得なかった。したがって、今後はピークを最短時間で捉えるためのアルゴリズムを考えていかなければならない。

動物実験では、親子内視鏡で胆のう摘出術を行ったが、内視鏡映像から奥行き把握が困難であった。術具追従処理から得られる三次元的位置はその一助となると考えられる。

(4) データ通信機能およびデータ蓄積・検索機能の改良

《DICOMIF サーバの改良》

通常、画像ビューワ（手術ナビゲーション装置を含む）では膨大なデータをデータベースで管理するために DICOM サーバを設けている。本システムでは、DICOM サーバとは別にナビゲーションコントロール装置との中継地点に DICOMIF サーバを設けた。DICOMIF サーバは医用画像やカメラ映像（動画・静止画）、本件での手術関連情報を一時的に保存し、高速にナビゲーションコントロール装置とデータを送受信できた。実験では約3～8MBの AVI ファイルを平均23.6MB/sで転送できることを確認済みである。

今回のように大幅な仕様変更が生じた場合でも、データ転送方式に Webservice を用い、インターフェースのみ公開することで、ナビゲーションコントロール装置と DICOMIF サーバで分散開発体制がとれ、早急に仕様変更に対応できた。

本件では、動画像形式を意識することなく術中画像を管理できること、Webservice によりシステム開発・連携・メンテナンスコストの削減が図れ、利便性と可用性が向上することが実証された。

《StarFabric データ通信制御ソフトウェアの改良》

各装置からナビゲーションコントロール装置へのデータ転送速度を計測し、パフォーマンスを評価した。表3の評価用PCを使用し、データ転送性能を比較した。

PCによって若干の差異はあるが、PIO転送で約59MB/s、DMA転送では150～

160MB/sのデータ転送レートが確認できた。評価環境が Visual Studio 2003から Visual Studio 2005に変わったことから、標準ライブラリとして SSE2命令が使えるようになった。昨年度は「PIO転送」と「MMX命令を使用した転送」の2種について計測したが、今回は「MMX命令を使用した転送」は測定せず、「PIO転送」と「DMA転送」の2種について計測を行った。

StarFabric ボードが PCI Express 対応のボードに変わったことと、メモリ書込みの変更が加わったことにより、PIO 転送時の転送レートが昨年と比較して大幅な改善がみられた。また、DMA を使用することでさらに 2.5 倍の転送速度を得ることができた。

本件での改良により、チップセットの違いで性能が大きく変わらなくなった点、ナビゲーションコントロール装置以外の装置を柔軟に追加、変更できるようになった点、内視鏡のように動画像を転送する場合においても、2MByte 程度の画像であればリアルタイムにデータ転送できる点から、手術ナビゲーションシステムのデータ通信機能に適用できることが実証された。

表3 データ転送評価用 PC スペック表

装置名	使用 PC	CPU	Chipset
ナビ	HP xw4300	PentiumD 3.6GHz	Intel 955X Exp + ICH7
Node1	HP ML100	Xeon 1.86GHz	Intel E7320 + ICH7
Node2	HP ML115	Opteron 1.80GHz	nVidia MCP55S Pro
Node3	ASUS P5B-EPlus	Core2Duo 1.86GHz	Intel 965P + ICH8

## E. 結論

[I] MRI 装置で発生する磁場による吸引力を定量的に評価できる装置を開発した。強磁性体は、測定範囲を超える吸引力を与え、電子天秤に不具合を生じさせる恐れがある。しかし、強磁性体は磁場を増加させていくとき、安定した位置・姿勢を取ろうとして移動するため、それを検出して測定を中止することとした。逆に言えば、被測定物が移動する場合は、強磁性体であることが明らかになる。

MRX 手術室に大型ディスプレイなどを手術室に持ち込むため、モニタ用シールドボックスを試作した。性能評価を行った結果、シールドフィルムを6枚張り合わせたシールドにより、MRI 画像の画像ノイズが許容できるシールド性能が得られ、MRX 手術室内へ大型ディスプレイを設置可能とした。

無影灯を床走行式とし、MRI 装置のそばに置いて利用しても、MRI 画像撮影への支障が生じないように電磁波ノイズを低減した MRI 対応スタンド式無影灯を開発した。照明傘の姿勢保持機構は分銅錘にとるバランス機構とし、土台部の脚の長さは、大きい転倒角度に耐え、かつ、照明傘のオーバハンクが確保される脚の長さとした。非磁性化が困難な電源トランスは、照明傘と支持土台部分と分離し、シールドされた筐体に格納し、電源コンセント付近に置く形態とすることで、設置可能とした。

[II] 超音波を利用して位置検出を行う実験評価装置の改良を行った。超音波の出力形式を単一パルス方式からバースト形式に変更し、受信信号に対する応答感度が向上

した。水中での原理検証実験を行い、位置センシング装置として十分な精度で位置を検出できることを確認した。ただし、超音波の音速が局所的に変わる非一様媒質中で使用した場合に精度が低下する問題や、空気層が存在する場合にセンシングが不可能となる問題を解決するためには、更なる改良と検証が必要だと思われる。

内視鏡画像から術具の位置・姿勢検出を行うアルゴリズムの開発を行った。日立製作所機械研究所が製作した位置検出用マーカーを使用して、平均相互情報量を用いた基本アルゴリズムの原理検証実験を行い、位置検出誤差が1mm程度、術具方向角度検出誤差が2deg程度、術具軸周り角度検出誤差が5deg程度であることを確認した。本手法の処理速度を向上するため、術具のおおよその位置・姿勢を検出するアルゴリズムを開発した。この二つのアルゴリズムの併用により、総合的な処理時間の高速化を実現することができた。ただし、位置・姿勢検出に要する時間は1.5min程度であり、リアルタイムでのセンシングを行うためには更なる高速化が必要である。また、検出結果の精度が低下する場合や、明らかに異なる検出結果が得られる場合があった。これらの現象を引き起こす原因は一部特定できており、ロバストな検出処理を行うにはアルゴリズムをさらに発展させる必要がある。

[III] 手術ナビゲーションシステムに関し、機能やインターフェースを容易にカスタマイズでき、それ自体がユーザに合わせてその動作を調整できる手術ナビゲーションシステムを開発することを目標に、要素技術開発を行った。

プロトコルの使用順序および使用頻度から、事例ベース推論を行い、ストーリーを制御する制御エンジンを開発した。評価用イベントビューワにより、ストーリー制御エンジンの動作確認を行い、テストシナリオで入力効率が向上することを確認した。

プロトコルやインターフェースをカスタマイズし、ストーリーを組立てるためのデータ構造、及び制御マネージャのアーキテクチャを設計した。プロトコルオブジェクトモデルツリーで表現されたデータ構造は、ストーリー制御エンジンと相乗作用し、極めてデータ効率が高い構造となった。また、機能追加によるルール変更の開発工数を軽減でき、開発者にとってメリットが大きい構造となった。

内視鏡画像による術具位置センシングを用いて、術具の位置を追従できるアプリケーションを開発し、手術ナビゲーションシステムへ実装した。動作検証のため、模擬実験や動物実験を行った。模擬実験では、術具位置追従処理結果に連動して、術具先端の位置や方向で切断された三面図 MPR 画像や 3D ガイド画像を正確に表示でき、内視鏡座標系での三次元的位置や仰角・方位角・軸角を数値化できた。しかし、動物実験では、画像の特徴量や、内視鏡の内部仕様に起因し、安定して術具位置を検出できなかった。今後、マッチングの算出精度や処理速度を向上させるためには、アルゴリズムの更なる改良が必要と思われる。

データ蓄積・検索機能として開発してきた DICOMIF サーバの通信インターフェースの改良では、動画形式を意識することなく術中画像を管理できること、WebService によりシステム開発・連携・メ

ンテナンスコストの削減が図れ、利便性と可用性が向上することが実証された。データ通信機能として開発してきた StarFabric データ通信制御ソフトウェアの改良では、チップセットの違いで性能が大きく変わらなくなった点、ナビゲーションコントロール装置以外の装置を柔軟に追加、変更できるようになった点、内視鏡のように動画画像を転送する場合においても、2MByte 程度の画像であればリアルタイムにデータ転送できる点から、手術ナビゲーションシステムのデータ通信機能に適用できることが実証された。

## G. 研究発表

### 1. 論文発表

該当なし。

### 2. 学会発表

該当なし。

## H. 知的財産権の出願・登録状況

### 1. 特許取得

3 月中に 1 件出願予定,発明の名称: 定位的放射線治療装置,発明者: 国立がんセンターとの共同出願

### 2. 実用新案登録

本年度は該当なし。

### 3. その他

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
Suzuki T, Sakuma I, et al.	Mechanical error analysis of compact forceps manipulator for laparoscopic surgery	Vanja Bozovic	Medical Robotics	I-Tech Education and Publishing	Austria	2008	433-442
Sakuma I, Chui C.	METHODS IN COMBINED COMPRESSION AND ELONGATION OF LIVER TISSUE AND THEIR APPLICATION IN SURGICAL SIMULATION	Cornelius T Leondes	BIOMECHANICAL SYSTEMS TECHNOLOGY	World Scientific	Shingapore	2007	225-270
土田敬明.	肺癌の画像診断-内視鏡所見	江口研二、 横井香平、 弦間昭彦、 工藤翔二	肺癌のすべて	文光堂	東京	2007	116-122
土田敬明.	気管支鏡検査	野村和弘、 平出朝子、 田村友秀	肺がん	メジカルフレンド社	東京	2007	38-41
土田敬明.	気管支鏡検査で、どのように肺がんの確定診断をするの？	加藤治文、 平野隆、 坪井正博	肺がんケアQ&A	総合医学社	東京	2008	68-69

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
垣添忠生.	これからの日本のがん対策のあり方	日消がん検診誌	45(1)	11-18	2007
Tsuchiya R.	Surgery for Stage INSCLC in Japan	2 <sup>nd</sup> Forum on Lung Cancer for China-Korea-Japan		1-5	2007
Tsuchiya R.	Adequate lymph node mapping	12 <sup>th</sup> World Congress on lung Cancer		1	2007
Tsuchiya R.	Perspective on Lung Cancer Management in Japan	Collaborative Clinical Cancer Trials Conference between the U.S. and Japan in Karuizawa		1	2007
Tsuchiya R.	Surgery for T4 Lung Cancer	中国一般胸科外科学会		1	2007
Tsuchiya R.	Advancement of Surgical for Lung Cancer in Japan: Past, Present and Future	4 <sup>th</sup> Bi-Annual Meeting of Asian Thoracic Surgical Club		1	2007

Tsuchiya R.	Combined Resection for Lung Cancer with Superior Vena Cava Involvement	14 <sup>th</sup> PATACSI ANNUAL CONVENTION and POSTGRADUATE CORSE "New Frontiers in Thoracic, Cardiac and Vascular Surgery"		1-3	2007
土屋了介.	がん対策基本法と放射線治療	第4回医用原子力技術研究振興財団講演会		1	2007
Tsuchiya R.	The Association of Japanese Thoracic Surgeons	中国胸科外科論議		1-6	2008
Nomori H, Kobayashi T, et al.	Sentinel node navigation segmentectomy for clinical stage IA non-small cell lung cancer	The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery	133(3)	780-785	2007
小野木真哉, 佐久間一郎, 他.	MRIによる小型受信コイルの位置姿勢計測法の開発と評価	生体医工学	45(2)	177-184	2007
Aoki E, Sakuma I, et al.	Development of an Intraoperative Information Integration System and Implementation For Neurosurgery	Journal of Robotics and Mechatronics	19(3)	339-352	2007
Sakuma I, Iseki H, et al.	Precise micro-laser ablation system with intra-operative fluorescence image guidance	19th International Conference of Society for Medical Innovation and Technology (SMIT2007)		275-276	2007
Suzuki T, Sakuma I, et al.	Ultrasonic motor driving method for EMI-free image in MR image-guided surgical robotic system	Proceeding of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems		522-527	2007
吉村雄, 佐久間一郎, 他.	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の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		37-38	2007
芦田秀一, 佐久間一郎, 他.	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		45-46	2007
王凱濂, 佐久間一郎, 他.	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		117-118	2007
安藤岳洋, 佐久間一郎, 他.	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		137-138	2007
鈴木孝司, 佐久間一郎, 他.	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		147-148	2007

島谷浩二, <u>佐久間一郎</u> , 他.	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		159-160	2007
Chui C, <u>Sakuma I.</u>	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		177-178	2007
西澤幸司, <u>村垣善浩</u> , 伊関洋他.	狹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
Aoki E, <u>Muragaki Y</u> , Sakuma I, et al.	Development of an intraoperative information integration system and implementation for neurosurgery	Journal of Robotics and Mechatronics	19(3)	339-352	2007
伊関洋, <u>村垣善浩</u> , 堀智勝, 他.	脳外科領域における術中ナビゲーションシステム 術中ナビゲーションシステムの現在	映像情報Medical	39(6)	578-583	2007
八木昭彦, <u>土肥健純</u> , 他.	スライダリンクと空気圧を用いた手術器具挿入支援用柔剛可変外套管の開発	日本コンピュータ外科学会誌	9(1)	15-22	2007
山下紘正, <u>土肥健純</u> , 他.	バイポーラコアギュレーターを有する細径2自由度屈曲マニピュレータの開発	日本コンピュータ外科学会誌	9(2)	91-101	2007
松宮潔, <u>土肥健純</u> .	焼灼と切削の組み合わせによる経尿道的前立腺がん切除のためのロボットデバイス: 切除性能と位置決め精度に関する基礎的検討	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		139-140	2007
Matsumiya K, <u>Dohi T</u> , et al.	design of a Surgical Robot Device for Non-Metastasis Mechanical Transurethral Resection of the Prostate by Repetitive Minute Cauterization and Milling	Proceedings of The 3rd Asian Conference of Computer Aided Surgery		CD-ROM	2007
Zuo S, <u>Dohi T</u> , et al.	MRI Compatible Rigid-flexible Outer Sheath Device Using Pneumatic Locking Mechanism for Endoscopic Treatment	4th Asian Conference of Computer Aided Surgery		in print	2007
山崎潤, <u>館暲</u> , 他.	トレイグジスタンスの研究(第54報)-再帰性投影技術を用いた両眼立体視システムにおける手元への視覚提示の効果-	第12回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集	12	211-212	2007
城堅誠, <u>館暲</u> , 他.	光学迷彩のための撮影対象物体の距離情報に応じた画像補正	第12回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集	12	159-160	2007

Konishi K, Hashizume M, et al.	A real-time navigation system for laparoscopic surgery based on three-dimensional ultrasound using magneto-optic hybrid tracking configuration	International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery	2	1-10	2007
荒田純平, 橋爪誠, 他.	低侵襲手術支援システムによる日本-韓国間遠隔手術実験	日本コンピュータ外科学会誌	8(4)	401-407	2007
村山芳隆, 石山和志, 荒井賢一, 他.	10-13T台の磁界検出分解能を有する高周波伝送線路型薄膜磁界センサ	日本応用磁気学会誌	31	17-22	2007
中居倫夫, 石山和志, 荒井賢一, 他.	不連続インピーダンス変化特性を有した薄膜GMIセンサと微分回路を組み合わせた磁界検出方法に関する検討	日本応用磁気学会誌	31	216-220	2007
加藤智紀, 石山和志, 荒井賢一.	形状磁気異方性による高周波キャリア型磁界センサの異方性制御	日本応用磁気学会誌	31	227-230	2007
Satani T, Amemiya R, et al.	Amyloid deposition in primary pulmonary marginal zone B-cell lymphoma of mucosa-associated lymphoid tissue	Pathology International	57	746-750	2007
中島崇裕, 土田敬明, 他.	肺癌術前リンパ節転移診断における、コンベックス走査式超音波気管支鏡ガイド下生検 (EBUS-TBNA) の実際	肺癌	47(3)	207-214	2007
中馬広一.	骨転移による病的骨折, 脊髄圧迫症状に対する手術療法	がん患者と対症療法	18(1)	40-46	2007
中馬広一, 中谷文彦.	がん骨転移における骨代謝異常	日本臨床	65(9)	543-549	2007
中馬広一, 中谷文彦.	悪性骨軟部腫瘍に対する術前治療- 高い治療成績と機能再建を求めた治療法の確立	医学のあゆみ	221(4)	297-302	2007
Kinoshita T.	Sentinel lymph node biopsy is feasible for breast cancer patients after neoadjuvant chemotherapy	Breast Cancer	14(1)	10-15	2007
Tsukamoto S, Kinoshita T, et al.	Brain metastases after achieving local pathological complete responses with neoadjuvant chemotherapy	Breast Cancer	14(4)	420-424	2007
Kurebayashi J, Kinoshita T, et al.	The prevalence of intrinsic subtypes and prognosis in breast cancer patients of different races	The Breast	16	72-77	2007

Akashi TS, Kinoshita T, et al.	Favorable outcome in patients with breast cancer in the presence of pathological response after neoadjuvant endocrine therapy	The Breast	16	482-488	2007
赤木智徳, 木下貴之.	Intracystic papillary carcinoma (ICPC)の診断と臨床的特徴-自験例14例からの検討-	乳癌の臨床	22(4)	280-285	2007
藤元博行.	非神経温存前立腺広汎切除術における排尿機能	Urology View	5(2)	51-57	2007
藤元博行.	II. 臨床研究 治療 外科治療 広汎前立腺切除術	前立腺癌-基礎・臨床研究のアップデート-, 日本臨床	65(10)	331-334	2007

## Mechanical error analysis of compact forceps manipulator for laparoscopic surgery

<sup>1</sup>Takashi Suzuki, <sup>2</sup>Yoichi Katayama, <sup>3</sup>Etsuko Kobayashi and <sup>3</sup>Ichiro Sakuma

<sup>1</sup>Advanced Biomedical Engineering and Science, Tokyo Women's Medical University,

<sup>2</sup>Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo,

<sup>3</sup>Graduate School of Engineering, The University of Tokyo  
Japan

### 1. Introduction

Laparoscopic surgery, sometimes called "keyhole surgery", is one of minimally invasive surgical techniques. All procedures are completed inside abdominal cavity through 3-4 small holes on the abdomen using rigid thin videoscope and long-handled surgical instruments such as clamp, scissors, and scalpel. This patient-friendly technique has a lot of merits compared with conventional laparotomy; less pain, shorter hospital stay, and lower medical costs. It is, however, a difficult procedure. As the linear-shape forceps are bound at the incision hole, symmetrical motion is required around the fulcrum. Surgeons have only four Degrees of Freedom (DOF); two DOFs are for the orientation of forceps, and the other two for axial rotation and longitudinal translation of forceps (Fig. 1), so that laparoscopic surgery needs highly-skilled surgeons with enough experiences.

As one of engineering solutions responding to these clinical issues, surgical manipulators are developed and some of them, such as da Vinci® Surgical System, are clinically applied. These manipulators are aiming to enhance surgeons' ability and dexterity, not for automatic robot surgery. While great contribution to high-quality surgical procedure using three-dimensional view and dexterous robotic hands, one of the drawbacks of surgical manipulators is their size. Conventional operating theatre is too small to install the robotic surgery system. Thus, space-saving, miniaturized manipulator is required.

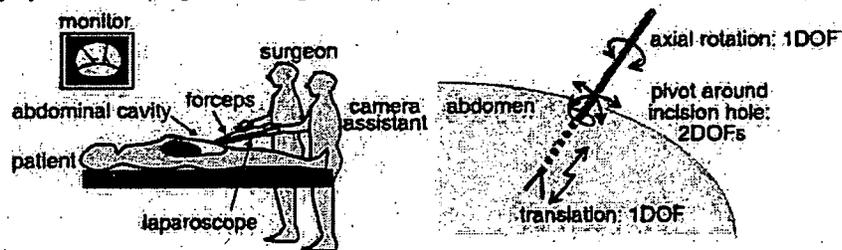


Figure 1. Laparoscopic surgery; surgeon manipulates forceps watching video from laparoscope controlled by camera assistant (left). Limitation of degrees of freedom (rotation, translation, and pivot) is one of causes that make laparoscopic surgery difficult for surgeon (right)

We have developed a compact forceps manipulator using "friction wheel mechanism" (FWM) and "gimbals mechanism" (Suzuki, et al., 2002) and evaluated it (Suzuki, et al., 2005). In this paper, we 1) introduce the mechanism of the manipulator and 2) describe the mathematical analysis of the mechanical error and correction factor based on mechanism of manipulator and the measured error.

## 2. Method

### 2.1 Mechanical configuration

In laparoscopic surgery, at least four DOFs are required for forceps motion: axial rotation and longitudinal translation of the forceps, and pivot motion around the incision hole on the abdomen (Fig. 1). We realize only four DOFs because redundancy may disturb the miniaturization and simplification of mechanism; those are important factors for clinical application and commercialization. The compact forceps manipulator we have developed consists of two mechanical subcomponents; Friction Wheel Mechanism (FWM) and Gimbals mechanism. The FWM provides axial rotation and longitudinal translation of forceps using friction drive mechanism. Gimbals mechanism realizes pivot motion of forceps. The prototype is shown in Fig. 2. Dimensions of manipulator are  $80 \times 150 \times 320 \text{ mm}^3$  and weight is 1.7 kg.

### 2.2 Friction wheel mechanism

Friction wheel mechanism consists of a couple of friction wheel that has three tilted driving rollers and outer case (Fig. 3).

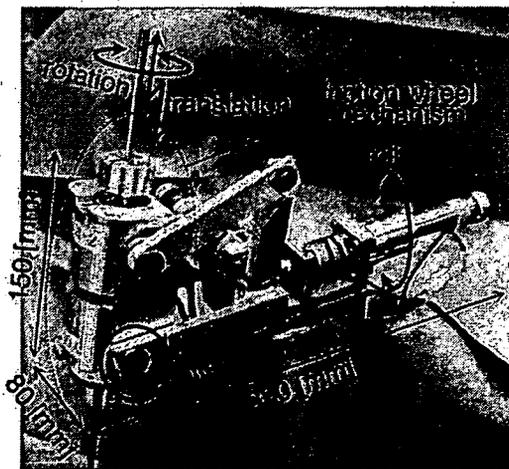


Figure 2. Prototype of compact forceps manipulator; friction wheel mechanism provides rotation and translation of forceps; gimbals mechanism realizes pivot motion (roll, pitch)

Three rollers are radially-located in the case with 120-degree gap, and the forceps shaft is inserted among those rollers. When the outer case is rotated, the rollers travel on the surface of forceps spirally. The shaft is relatively driven by the driving rollers using friction force between rollers and surface of forceps in spiral trajectory. We adopted hollow-shaft