

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：若手研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18680041
 研究課題名（和文） 精密手術誘導・治療を実現する低侵襲手術支援内視鏡システム
 研究課題名（英文） Robotic Endoscope system to achieve the precise therapy on minimally invasive surgery
 研究代表者
 正宗 英津子（小林 英津子）（MASAMUNE ETSUKO）
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号 20345268

研究成果の概要：本研究では、機能的な腫瘍情報を元に、治療具を精密に誘導し治療するためのロボットシステムを実現した。具体的には、ウェッジプリズムを用いた可変視野内視鏡を開発し、ウェッジプリズム内視鏡独自の歪みを補正し、術前 MRI 画像との統合を行った。また、体内深部での治療を可能とするための細径屈曲鉗子の開発、および軟性内視鏡下での鉗子駆動法の提案および実装を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2007 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2008 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	16,100,000	4,830,000	20,930,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：コンピュータ外科，医用ロボット

1. 研究開始当初の背景

現在、手術中にMRIを用い患部位置を正確に把握し治療を行う画像誘導下手術が注目を浴び、多くの研究が行われている。現在の術中画像誘導下手術では主に臓器の形態情報のみの取得にとどまっているが、今後はさらに機能画像を融合し、組織の性状を含めた詳細な患部情報を得ることにより、さらなる低侵襲手術を実現することが期待される。

さらに体内深部においても患部情報取得が可能な内視鏡と治療具を位置決めする微細ロボットシステムへの期待が高まっている。

2. 研究の目的

本研究では、機能的な腫瘍情報を元に、治療具を精密に誘導し治療するためのロボットシステムを実現することを目的とする。特に体内深部において内視鏡と治療具を位置決めする微細ロボットシステムを開発する。具体的には

手術誘導三次元内視鏡システムの開発；体内深部での術野表面形状情報を取得しかつ広範囲の視野を取得可能な三次元内視鏡を開発する。そしてこれらと機能画像との融合を行い、患部への術具誘導を実現する。

各種治療具の微細ロボットシステムの開発；術具自体の位置決めを行う小型マニピ

ュレータシステム及び体内深部で有用な高度先端治療具およびその微細術具位置決め機構を開発する。

最終的には、ファントム実験による精度評価実験、in-vivo 下において術具誘導評価実験を行い、本システムの有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、上記目的に基づき、

- (1) 広範囲の視野を取得可能な三次元内視鏡の開発
- (2) 三次元内視鏡と術前医用画像との統合
- (3) 細径屈曲鉗子の開発
- (4) 鉗子制御法の開発

に関する研究を行った。以下各項目に関して述べる。

- (1) 広範囲の視野を取得可能な三次元内視鏡の開発

細径の三次元内視鏡先端にウエッジプリズムを2枚取り付け、これを独立に回転することにより視野可変が可能な、3次元可変視野内視鏡の開発を行った。開発した内視鏡を図1に示す。ウエッジプリズムは円筒を斜めに切断した形状のレンズで、光を厚い方に屈折させ、光軸の角度を変える性質を持つ。この特性を利用して、2枚のウエッジプリズムを重ね、互いに独立に回転させ、光軸を屈折させることによって平面内または立体空間における任意の視野を実現する。

三次元内視鏡は、直径5.4mmで、先端に1/10inchのCCDカメラが2枚取り付けられており、輻輳角が2.8°である(新興光機社製)。これに8.5mm、12mm、ウエッジ角10°のウエッジプリズムを設置する。プリズムは鏡筒を介してモータにより回転し、視野移動を実現する。

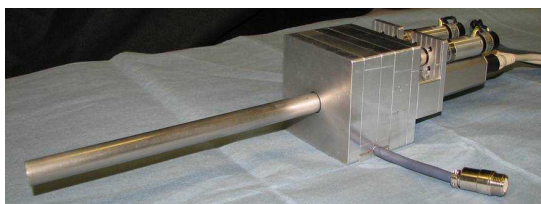


図1 ウエッジプリズムを用いた三次元可変視野内視鏡

- (2) 三次元内視鏡と術前医用画像との統合

腫瘍や重要な血管の位置情報などを含む術前3次元画像と、術中画像を合成し提示することで、精確でかつ安全な手術が行える新しい手術支援システムの構築を目指し、術前画像をMRI、術中画像をウエッジプリズム3D内視鏡とし、画像統合を行った。

本研究では、ウエッジプリズム3D内視鏡による取得画像の歪みの補正アルゴリズムの開発、術前MRI・術中内視鏡画像のレジストレーションアルゴリズムの開発を行い、手術ナビゲーションシステム上でシステムとして統合させ表示を行った。

ウエッジプリズム内視鏡は、その取得画像に特有の歪みが生じる。そこで、ウエッジプリズム内視鏡の光軸の移動などに対応させた新たなカメラモデルを考案した。ウエッジプリズム内視鏡と通常の内視鏡との最大の違いは、先端に設置された2枚のプリズムである。そのため、ウエッジプリズム専用のカメラモデルは、ピンホールカメラモデルにプリズム通過部分の光線追跡モデルを付加することで構築することが可能である。

提案するウエッジプリズムカメラモデルでは、CCDカメラ部分とウエッジプリズム部分をモデル上で完全に分離させた。このため、CCDカメラ部分については通常のカメライヤブレンド手法が利用でき、放射歪み・接線方向歪みといった通常のカメライヤ歪みもそのまま考慮できる。ウエッジプリズムに関する処理は、それらの処理結果に対してプリズムの光線追跡によって得られた結果を付与させる形で行うこととした。

本研究では、術前画像として得られる3次元MRIと術中内視鏡画像の統合を行った(図2)。

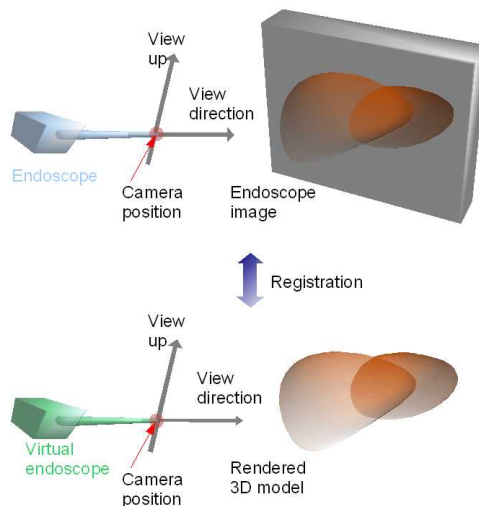


図2 術前画像とウエッジプリズム内視鏡のレジストレーション法

考案したレジストレーションアルゴリズムは、大きく2ステップに分かれる。まず1ステップ目として光学式3次元位置計測装置(OTS)を利用した初期レジストレーションを行う。次に2ステップ目として、プリズムの回転情報を利用して内視鏡での実際の視野変更をMRIの3次元モデル上でも追従さ

せ、視野変更後のレジストレーションを行う。

MRI 撮像により直接取得できる画像は、3次元ボリューム画像である。だが、手術時に術者が内視鏡画像への付加画像として MRI 画像を利用する際、3次元ボリュームデータよりもそれを元にレンダリングされた 3D モデルのほうが内視鏡との関連付けが直感的に行いやすいといえる。そのため、ウェッジプリズム内視鏡画像に対するレジストレーションの対象は 3D レンダリングモデルとした。また、レジストレーションアルゴリズムの単純化や単眼・3D 内視鏡間でのアルゴリズム基礎部分の共通化のため、内視鏡の位置としてウェッジプリズム内視鏡内の CCD カメラ鏡筒部の幾何中心の位置を利用した。

(3) 細径屈曲鉗子の開発

これまで本研究室で開発を行ってきた、ワイヤを用いた屈曲 2 自由度鉗子の細径化を行った。屈曲関節の駆動機構には、ワイヤ拮抗配置ならびに転がり摩擦を用いた関節構造を採用した。

ワイヤを用いた屈曲機構はワイヤの破断が大きな問題となる。そこで、ワイヤ経路途中に超弾性合金とステンレスロッドの溶接ワイヤを用い、超弾性合金を破断防止のトルクリミッタとして利用した。また、先端屈曲部の各 부품の小型化をすることにより、鉗子の細径化を計った。モータは手持ち鉗子部には設置せず、ワイヤを介して動力を伝達することとし、鉗子部全体の軽量化を図った。

(4) 鉗子制御法の開発

体内深部への術具誘導には軟性内視鏡と軟性鉗子による鉗子ロボとシステムが有用である。しかし、軟性鉗子の操作が難しい原因として、モニタ上の上下左右と鉗子操作部の上下左右が一致しないことが挙げられる。これは鉗子軟性部の捩れ等により、Hand-eye coordination を実現するのが難しいからである。そこで、内視鏡画像を用いて軟性鉗子の姿勢を推定し、画像座標系と操作座標系の関係を自動的に同定してその差異を補正することにより、軟性内視鏡・鉗子の操作性を向上させる手法を提案した。

システム構成図を図 3 に示す。システムは大きく 4 つの要素にて構成される。それは、軟性鉗子マニピュレータ先端屈曲部(以下、マニピュレータ)、マニピュレータへ動作指令を送るモータ指令部、内視鏡カメラ(以下、内視鏡)、モニタである。

今、内視鏡にてマニピュレータを撮像し、その結果がモニタ上に投影されている。術者はモニタ座標系にて鉗子の姿勢に対する指令を与える。従来の硬質なマニピュレータであれば、モータと鉗子先端部の座標変換値は機構学的に一意に決まるが、今回はその間に

軟性部の捩れによる未知の回転が存在すると想定し、これを画像処理により補正するアルゴリズムの提案を行った。

また、鉗子の姿勢計測には、円柱の棒に、緑色と白色を交互に配置した縞模様を有し、さらに白色面上に 5 ビットのエンコーダを配置した画像マーカを用いた。

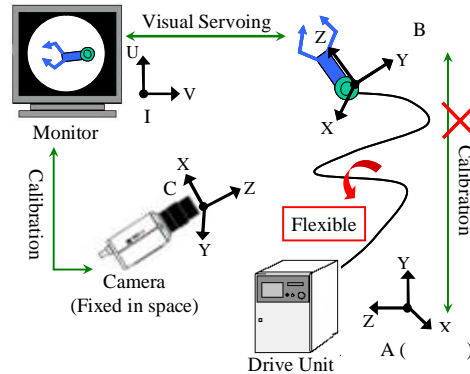


図 3 鉗子制御システム構成図

4. 研究成果

(1) 広範囲の視野を取得可能な三次元内視鏡の開発

開発した内視鏡は直径 14mm (光源をのぞく) であり、視野移動角 14.5° を実現した。

ウェッジプリズム三次元内視鏡において、プリズムの歪みが奥行き情報計測にどの程度影響を与えているのか確認するために、ウェッジプリズム三次元内視鏡での奥行き情報提示における主観的な評価を行った。

3D ウェッジプリズム正面(プリズムの影響が最も小さい)、3D ウェッジプリズム右方向(プリズムの影響が最も大きい)、2D という 3 つの条件による奥行き感評価を行った結果、プリズムが正面を向いている状態の三次元画像を見せた場合と、その他の二つの場合の結果の間には、有意水準 1% で平均正答率に差が見られた。これにより、プリズムによる画像の歪みが奥行きの主観的評価に影響を与えていると考えられ、歪み補正の必要性が示唆された。

さらに、ウェッジプリズム三次元内視鏡を用いて特に肝臓を対象とした三次元形状計測手法の開発を行った。三次元計測は、項目(1)において提案した歪み補正を行ったあと、右画像と左画像の対応点を求め、空間座標を求めた。また対応点は正規化相互相関(NCC)により求めた。

$$NCC(I^L, I^R) = \frac{\sum_{u,v} (I^L(u,v) - \bar{I}^L)(I^R(u,v) - \bar{I}^R)}{(w)^2 \sqrt{\sum_{u,v} (I^L(u,v) - \bar{I}^L)^2 (I^R(u,v) - \bar{I}^R)^2}}$$

形状が既知のモデルを用いた精度評価実

験の結果、距離 50mm 以内の範囲においては、誤差 4mm 以内での計測が可能であった。

(2) 三次元内視鏡と術前医用画像との統合

提案したウェッジプリズム内視鏡の歪み補正アルゴリズムの精度を評価するため、実験を行った。

実験は、光学端子台の上に内視鏡を水平に設置し、正面観察時と右方向観察時のときで行った。正面観察時には内視鏡に対して直角になるように、また右方向観察時には、変化後の視野方向に対して直角になるようにチェックパターンを設置して実験を行った。実験結果を図 4 に示す。内視鏡画像の歪みが補正されたのが観察された。

チェックパターンの補正の評価基準として、直線性の回復度を用いた。データの線形フィッティングの指標として用いられている R2 乗値の平均値を利用した。R2 乗値が 1 に近づくほど、得られたデータの線形性が高く、1 の場合はすべてのデータが一つの直線上に乗っていることを意味する。その結果、正面観察時に、R2 乗値の平均値が歪み補正なしの 0.31 から 0.83 に大幅に改善しており、右方向観察時には約 0.48 から 0.94 へと改善していた。

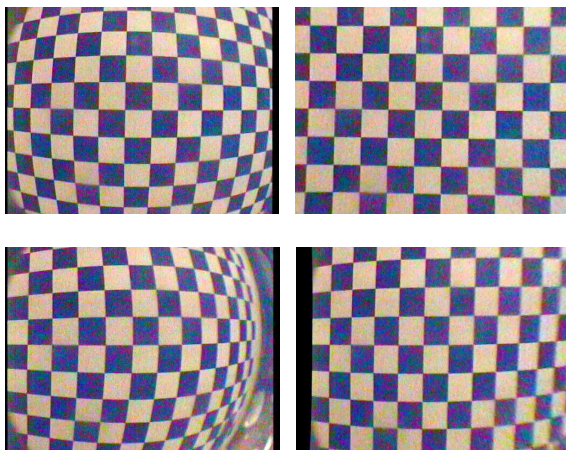


図 4 ウェッジプリズム 3D 内視鏡の歪み補正実験結果（上左：正面補正前，上右：正面補正後，下左：右視野補正前，下右：右視野補正後）

MRI にて取得したボリュームデータを 3D Slicer 上で処理し、MRI での 3D モデルを得た。さらに初期レジストレーション用に解剖学的特徴点を 3 箇所選択し、正面及び視野変更後の内視鏡画像と MRI モデルの重ね合わせを行った。重ね合わせを行った図を図 5 に示す。

MRI 対応マーカのピクセル誤差は視野方向正面で x:15, y:18 であり、視野方向上ときは x:25, y:9 であった。

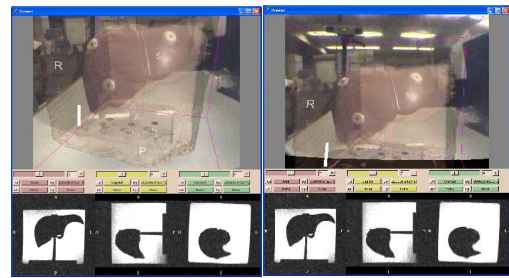


図 5 内視鏡画像と術前 MRI 画像との統合

(3) 細径屈曲鉗子の開発

開発した屈曲鉗子を図 6 に示す。鉗子部直径 7mm，本体重量 740 g を実現した。

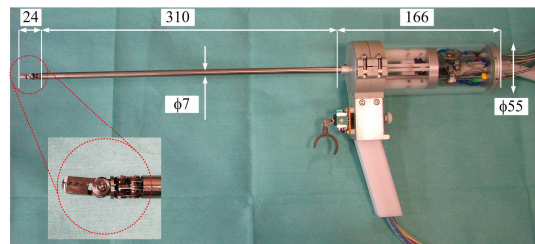


図 6 細径 2 自由度屈曲鉗子

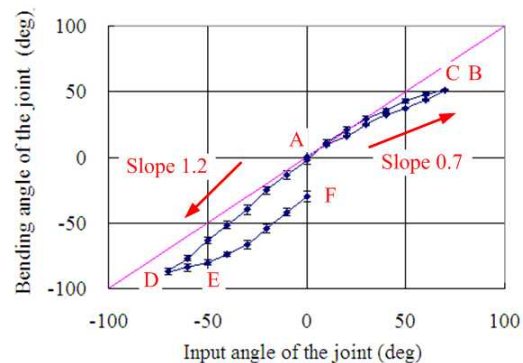


図 7 鉗子位置決め評価実験結果

製作した鉗子は長いワイヤを介して駆動伝達をするため、ワイヤののびによるバックラッシュが多く存在する。これに対し、バックラッシュ補正制御法を実装し、屈曲動作評価実験を行った。屈曲関節の回転入力角を 0 deg から +90 deg，その後 +90 deg から -90 deg，最後に -90 deg から 0 deg まで 10 deg 刻みに変化させ、鉗子先端の実際の関節回転角を、デジタルマイク scop (VW-6000, KEYENCE) を用い計測した。結果の 1 例を図 7 に示す。バックラッシュ補正制御を導入することにより、少ないバックラッシュでの駆動が可能であった。

(4) 鉗子制御法の開発

姿勢計測の精度を評価するため、光学式 3

次元位置計測装置(OTS)と姿勢評価器具を用いて計測した。カメラに対して奥行き方向に傾斜した9種類の姿勢にて計測を行った。画像で計測した鉗子軸上の軸ベクトルと、OTSで計測した同軸ベクトルがなす角を誤差として算出した。

その結果、カメラの光軸に対して垂直な面と平行な面(奥行き方向)に射影し、上記同様OTSとの誤差を求めた結果、垂直な面で誤差 -1.1 ± 1.3 [deg]、平行な面で誤差 -2.4 ± 5.8 [deg]であった。

本研究の想定するシステムを構築し、提案する手法において、よじれを考慮した鉗子の位置決めが可能であるかの検証実験を行った。それぞれの座標系のキャリブレーションを行った後、モニタにて目標姿勢を与え、マニピュレータ駆動した。内視鏡画像目標姿勢への位置決めが可能であった。

また、開発したシステムを用い、in vivo下で姿勢計測実験を行ったところ、誤差の標準偏差値で垂直な面で 1.7 [deg]、平行な面で 6.3 [deg]であった。

以上の結果より、内視鏡下での捩れを考慮した鉗子位置決めの可能性を示した。

本研究では、ウエッジプリズム3D内視鏡開発およびその歪み補正、術前画像とのレジストレーションを実装することで、安全で正確な手を実現する腹腔鏡下手術ナビゲーションシステムを実現した。また、細径鉗子マニピュレータ、鉗子制御法の開発を行った。以上のシステムを統合することで、体内深部の治療における術具の精密な誘導・治療が実現されると考えられる。

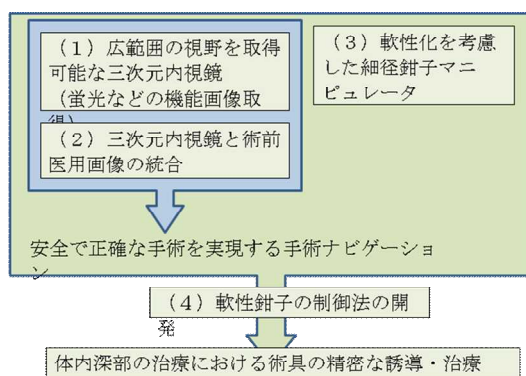


図8 システム構想

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

- (1) E. Kobayashi, T. Ando, H. Yamashita, I. Sakuma, T. Fukuyo, K. Ando, T. Chiba, A high-resolution, three-dimensional thin endoscope for fetal surgery,

Surgical Endoscopy, in press, 2009 (査読有り)

- (2) 小林英津子, 佐久間一郎, 外科領域におけるナビゲーション医療の現状と医療機器開発の動向, WEBJournal, 93, pp.12-15, 2008 (査読無し)
- (3) Takashi Suzuki, Yoichi Katayama, Etsuko Kobayashi, Ichiro Sakuma, Mechanical error analysis of compact forceps manipulator for laparoscopic surgery, Medical Robotics, pp.433-442, 2008 (査読無し)
- (4) 高田祐平, 小林英津子, 青木英祐, 橋本健正, 佐久間一郎, 土肥健純, ウエッジプリズムを用いた視野可変腹腔鏡の改良および画像評価, 日本コンピュータ外科学会誌, 8巻2号, pp. 97-102, 2006 (査読有り)

〔学会発表〕(計8件)

- (1) 小林英津子, 低侵襲手術支援ロボットシステム, 第17回日本コンピュータ外科学会, 2008.11.1, 東京
- (2) 吉村雄祐, 芦田秀一, 小林英津子, 佐久間一郎, 超弾性合金を用いた2自由度屈曲鉗子の開発(第2報), 第17回日本コンピュータ外科学会大会, 2008.10.31, 東京
- (3) Yuhei Takata, Takeshi Torigoe, Hongen Liao, Etsuko Kobayashi, Ichiro Sakuma, View following image registration between preoperative MRI data and wedge prism 3D endoscopic images, The 4th International Workshop on Medical Imaging and Augmented Reality, MIAR 2008, 2008.8.1, Tokyo, Japan
- (4) Y.takata, T.Torigoe, E.Kobayashi, I.Sakuma, Distortion Correction of Wedge Prism 3D Endoscopic Images, APCMBE2008, 2008.4.24, Tokyo, Japan
- (5) Etsuko Kobayashi, Yuhei Takata, Kenji Ikebe, Teruko Sakurai, Yasuyoshi Kita, Ichiro Sakuma, Depth perception Evaluation of the wide-sngle view 3D endoscope, 3rd Asia conference on computer aided surgery, 2007.12.1, Shingapore
- (6) 安河内孝則, 小林英津子, 廖洪恩, 佐久間一郎, 画像処理を用いた軟性鉗子マニピュレータの制御に関する研究, 第16回日本コンピュータ外科学会大会, 2007.11.2, 広島
- (7) Etsuko Kobayashi, Yuhei Takata, Kenji Ikebe, Teruko Sakurai, Ichiro Sakuma, Development of wide-sngle

view 3D endoscope using wedge prisms, Computer Assisted Radiology and Surgery 2007, 2007.6.27, Berlin, Germany

- (8) 小林英津子, 高田祐平, 佐久間一郎, 土肥健純, ウェッジプリズムを用いた視野可変腹腔鏡の開発, 東京大学臨床展開研究シンポジウム, 2007.3.2.東京

〔その他〕

- (1) German Innovation Award (Gottfried Wagner Prize 2008), 3rd Prize, Wedge-Angle View Endoscope Using Wedge Prisms, ドイツ商工会議所, 2009年3月6日
- (2) 東京大学工学部 2008-2009年版, 日経BPムック「変革する大学」シリーズ, 未知の領域を拓く研究者・研究プロジェクト掲載
- (3) 東京大学工学部 2007-2008年版, 日経BPムック「変革する大学」シリーズ, 未知の領域を拓く研究者・研究プロジェクト掲載
- (4) 東京大学テクノロジー & サイエンス, October2007, 日経BPムック, 未来を担う若手研究者特集掲載

6. 研究組織

(1) 研究代表者

正宗 英津子 (小林 英津子) (MASAMUNE ETSUKO)

東京大学大学院・工学系研究科・准教授

研究者番号 20345268

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者