

図13 距離センサ部

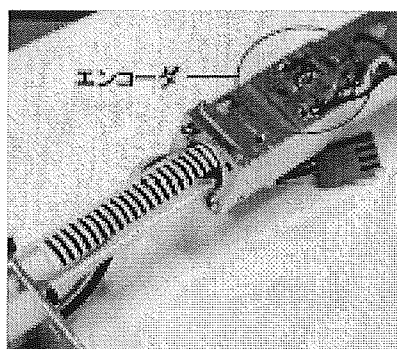


図14 伸縮量検出部

(倫理面への配慮)

本年度における本研究は機械的・光学的な要素および理論的要素のみを扱い、研究対象者に対する人権擁護上の配慮、研究方法による研究対象者に対する不利益、危険性の排除や説明と理解（インフォームド・コンセント）に関わる状況、実験動物に対する動物愛護上の配慮などは行う必要がある実験等は一切扱っていない。

C. 研究結果

C-1 投影の検証

指し棒の位置・姿勢・伸縮量情報に基づき、RPT システムが正しく投影を行えるかどうかの確認を行った。ポインタの位置・姿勢の取得には磁気式センサである Fastra を用いサンプリングレートは 120Hz とし

た。また、投影システムと再帰性反射材中心との距離を 120cm とした。トルソ型の実体型ディスプレイに投影されている様子を 図15 に示す。



図15 投影されている様子

C-2 ポインティングデバイスの検証

本システムでは、ポインティングデバイスが実体型ディスプレイの内部をポインティングしかつ内部の VR 物体に非接触の際、ポインティングデバイスはその先端と実体型ディスプレイ表面との距離を微小な一定距離に保ちつつ伸縮する。この機能について検証した。今回はポインティングデバイス先端と実体型ディスプレイ表面との距離を 2cm と設定した。その結果、表面に衝突せず追従することが確認された。しかし、時折伸縮量が振動する現象が見られた。また、本システムでは、ポインティングデバイスが実体型ディスプレイの内部の VR 物体に接触した際適切に力覚提示を行う。この機能を検証するために、実体型ディスプレイの内部にバーチャル平面を設定し、平面上をなぞる実験を行った。力覚提示の

有効性を検証するため、バーチャル平面に常時ポインタを密着させながらポインタを平面に平行な方向に動かすというタスクを課し、力覚提示の有無でタスクの精度がどのような変化するか比較した。本実験では、トルソ中心と視点との距離は 1200mm、バーチャル平面とトルソ中心との距離は 100mm とした。また、データのサンプリング回数は 10(回/s) であった。バーチャル平面はトルソからはみ出ない程度の有限の大きさとした。力覚提示無しの場合の結果を図 16 に、また力覚提示有りの場合の結果を図 17 に示す。

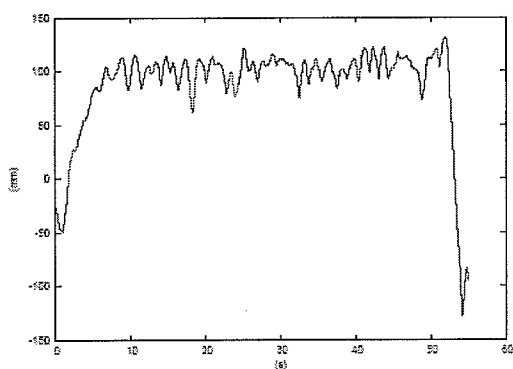


図 16 平面なぞり実験 (力覚提示無)

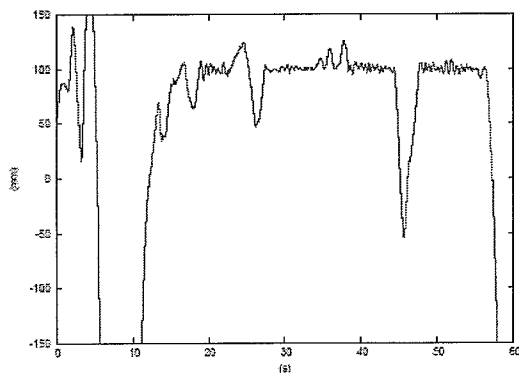


図 17 平面なぞり実験 (力覚提示有)

本実験ではポインタがバーチャル平面に

接触していない状態から開始させたため、平面からの距離が最初に 0mm となった瞬間をポインティング開始時刻とし、また最後に 0mm となった瞬間をポインティング終了時刻と定義した。ただし、力覚提示有りの場合において $t=0(s)$ から $t=5(s)$ までの間はバーチャル平面外において、バーチャル平面の位置よりも奥まで指せるかを確認しているためポインティング開始時刻は $t=5(s)$ 以降としている。このとき、非力覚提示時の標準偏差は 11mm、力覚提示時の標準偏差は 26mm であった。

D. 考察

D-1 投影の検証

投影実験から、ポインティングデバイスの位置が正しく認識され、正しい位置に投影されていることが確認できた。また、これによりリアルな空間とバーチャルな空間とのシームレスなポインタの移動が可能であることが確認された。

D-2 ポインティングデバイスの検証

D-2-1 実体型ディスプレイ表面への追従

実体型ディスプレイ表面への追従実験では、ポインティングデバイスが複雑な表面形状に対して追従して動作していることが確認された。しかし、先端が表面に触れることはなかったが時折先端位置が振動していることも確認された。これは、変動する摩擦が原因の可能性もある。また、デバイスと反射材表面とのなす角によって間隔の変動が見られた。これは、距離測定のための PSD センサがデバイスの中心軸から 15mm ほど離れた位置にあるためと考えられる。この問題を解決するには、デバイ

スの中心軸と PSD センサの中心軸を一致させる必要がある。しかし、デバイス先端には接触対象の表面保護のために直径 10mm の球が装着されており、このために上記の位置に PSD センサを持つてくることは困難である。そこで、他の方法としてはこの表面保護用球体自体を距離センサの一部にする方法が考えられる。すなわち、球体とデバイスとをばね定数の小さなばねにより連結し、この球体とデバイスとの距離を計測することで前述の問題は解決できる。しかし、ばね定数が小さいと球体の表面への追従性が悪化し、逆にばね定数が大きいと非力覚提示状態でも力を感じてしまうためこの方法は適切ではない。他に考えられるのは、センサの形状を球形とすることにより、センサ自身をデバイス接触時の表面保護用に用いることである。このためにはセンサと表面の距離が 0 でも計測できるセンサを用いる必要があるため、利用可能なセンサは限られる。利用可能な例としては金属センサがある。ディスプレイ部の内部または裏側に金属膜・金属板を配置することにより、その金属までの距離、すなわちディスプレイ表面までの距離を金属センサにより計測することが可能となる。

実体型ディスプレイの再帰性反射材の内側に、アルミ箔を張り、アルミ-再帰性際の 2層構造とすることで、金属センサを用いたディスプレイ表面への接近検知センサを構成可能である。この金属センサはサーチコイルと発振回路から構成される。サーチコイルに交流電流を流すと、近傍にある金属に渦電流が流れる。このとき、この渦電流は反作用磁束を発生する方向に流れるため、サーチコイルの起電力を変化させる。この

起電力は近傍の金属の種類・距離・面積・体積のそれぞれに依存するため、これを検知することによりセンサから金属までのおおまかな距離を測定することが可能となる。

この原理を利用して図 1 8 に示す回路と、図 1 9 に示すサーチコイルを用いて、実際に距離を計測して非接触状態と接触状態とを制御できることを確認した。

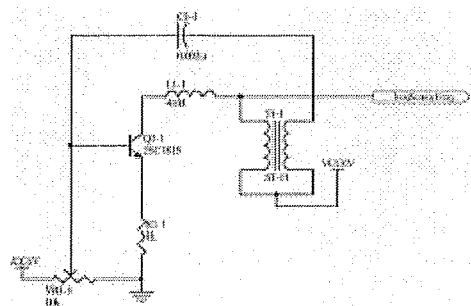


図 1 8 コイルを用いた距離センサ回路図

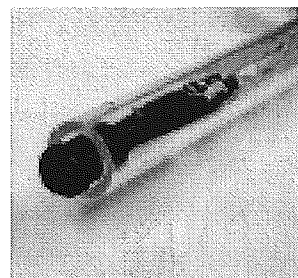


図 1 9 実装したサーチコイル

現時点における本センサの問題点としては、センサ出力が周波数であるために F/V 変換の際に遅れが生じ、距離制御用には適していないことと、再帰性反射材を金属で裏打ちすることにより Polhemus センサなどの磁場を用いたシステムとの共存が難しいことが挙げられる。

D-2-2 ポインティングの奥行き精度と力覚提示の有無

非力覚提示時は図 16 で示されるとおり、常に奥行き方向のポインティング位置が不安定であるのに対し、力覚提示時における位置は図 18 で示されるように安定してポインティングできている状態と不安定な状態に分かれている。現時点において、アクチュエータの構成要素であるプーリとワイヤとの間で間欠的にすべりが発生することが確認されており、このすべりが発生しているときに不安定な状態となっている。この問題は機構的な問題で設計の改良で改善される。

次に、力覚提示時に安定してポインティングできているときの標準偏差と、力覚提示無しの際の標準偏差を比較すると力覚提示時は 2.9mm、非力覚提示時は 11mm であった。このことから、常時安定した状態にすることができれば力覚提示を行うことによるポインティングにおける優位性は明らかだと言える。

E. 結論

本年度は「患者・医療情報統合システム」として、インフォームド・コンセントなどの際に患者に対して可視化する実世界指向型のディスプレイシステムのテストベッドを試作した。また、実世界指向型の視覚情報提示システムにおいて、実世界とシームレスに知覚可能なポインティングデバイスなどの要素技術の研究開発を行った。

これは、軸方向に伸縮し、力覚提示時には伸長しデバイス外部の物体に接触することで力覚を提示し、また非力覚提示時には適宜収縮してデバイスと外部の物体との接触を避ける機構を持つ指し棒型のポインティングデバイスである。このデバイスは実

空間と実体型ディスプレイ内のバーチャル空間の間でのシームレスにポインティングが可能である。これらの機能を満たすシステムを構築し、要素技術の有効性の検証を行い、有効であることを確認した。

最終的に目標とするシステム実装のテストベッドを開発し設計上の諸問題を洗い出し検証することで実装上の目処が立ったという意味で当初の目的は達成したことを確認できた。

G. 研究発表

- 論文発表
現在準備中
- 学会発表
再帰性投影技術におけるポインティングデバイス、第 10 回日本バーチャルリアリティ学会大会、pp.173-176, 2005.9
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－第 10 回日本バーチャルリアリティ学会大会、pp.239-240, 2005.9

H. 知的財産権の出願・登録状況

- 特許取得
なし
- 実用新案登録
なし
- その他
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

九大病院では平成15年から現在までに27回のロボット手術トレーニングセミナーを開催し、116名の参加者を数えるまでとなっている。参加された方は工学部の学部学生から日本でも有数の外科医とさまざまである。本研究の目的は、ロボット手術と通常の内視鏡下手術を比較検討しその特徴を明らかにし、有効なトレーニングプログラムを作成すること、およびトレーニングの有効性を明らかにすることである。da Vinciを用いて従来の内視鏡外科手術とロボット手術のパフォーマンスを比較した結果、全てのタスクでロボットの方が正確でエラーが少なく、また短期間のトレーニングで、手術経験の多寡にかかわらず一定のレベルに達することが明らかとなった。ロボット手術は治療の質の向上に寄与するものと考えられた。

A. 研究目的

九大病院ではロボット治療に関しての先端医療を担う医師の訓練や、工学系研究者ならびに企業の研究の教育・訓練の場として、ロボット手術トレーニングを施行している。ロボット手術は、まだ開発段階の先進医療であるため、医療の質を担保し安全性や信頼度などに対する社会的認知を得るためにトレーニングや技術認定が重要であると考えられる。本研究の目的は、ロボット手術と通常の内視鏡下手術を比較検討しその特徴を明らかにし、有効なトレーニングプログラムを作成すること、およびトレーニングの有効性を明らかにすることである。

B. 研究方法

対象は平成15年から現在まで、27回のロボット手術トレーニングに参加した116人を対象とした。手術支援ロボットはda Vinciを用いた。内視鏡外科の基本手技を、模型を用いた5つのタスク(Task1 Pegboard Patterns、Task2 Running Strings、Task3 Pattern Cutting、Task4 Ligation、Task5 Suturing

)のパフォーマンス(遂行時間、エラー)を通常の内視鏡下手術手技とda Vinciで比較した。

また同じタスク及びプタを用いた二日間のトレーニングを行い、トレーニング前後で評価用のタスク(体内縫合結紮)を行い、トレーニング効果を解析した。

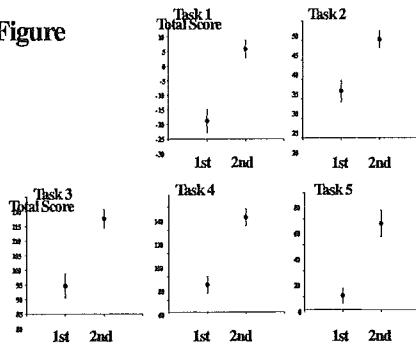
(倫理面への配慮)

本研究での個人情報には厳重な管理を行い、研究結果発表の場合に特定個人が認識されないよう配慮を行った。

C. 結果

Task1-5の全ての基本手技で、内視鏡手術鉗子よりもロボット鉗子の方が精確で速かった。また、2日間のトレーニング前後での評価においても、全てのTaskでスコアが上昇した。(Figure)二日間という短期間でトレーニング効果が著明に認められ、それまでの経験症例数にかかわらず一定のレベルに上達を認めた。通常の手術操作に比べてロボット鉗子を用いての操作は、Learning Curveが短く、一定の習熟度に達するまでの時間が短かった。

Figure



D. 考察

5つのTaskのうちRunning StringやPattern Cuttingなどの比較的簡単な操作においてはTotal Scoreの改善は速度の向上によるものであり、LigationやSuturingなどの実際に行う手術手技で、なおかつ従来の内視鏡外科手術において体腔内において困難とされていた手技は速度の向上のみならず、操作上Errorの低下により総合的なScoreの改善が認められた。これは視覚の3D化や7自由度を持ち合わせるEndowrist®を用いることによる利点と考えられる。また外科医の内視鏡下外科手術の経験の多寡にかかわらず、Scoreの向上を認めており、ロボット手術のトレーニングが短期間で安全な手術操作の習得をもたらす、治療の質の均一化、向上に寄与するものと考えられた。

E. 結論

マスタースレーブ型手術ロボットは通常の内視鏡下手術に比べて正確な手術操作が可能である。またロボット手術のトレーニングシステムを構築し、評価した結果、短期間で手技の向上が得られた。

G. 研究発表

1. 論文発表

橋爪 誠: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

Hashizume M: Image-guided Surgical Robotic System for the Future Minimally Invasive Surgery. Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery 7(2):132, 2005

橋爪 誠: 3. 医療ロボットの臨床応用 3.1 腹部手術への応用. 医療機器と再生医療 -開発最前線と今後の動向-: 121-130, 株式会社情報機構, 東京, 2005

2. 学会発表

橋爪 誠: 内視鏡外科手術の教育訓練について. 第18回日本内視鏡外科学会総会. 2005年12月7~9日, 東京

橋爪 誠: 腹部外科領域におけるコンピュータ外科手術の実際. 第14回日本コンピュータ外科学会大会. 2005年11月19~21日, 千葉

Ieiri S, Konishi K, Kakeji Y, Matsumoto K, Yasunaga Y, Kinjo N, Yamaguchi S, Yoshida D, Kenmotsu H, Kawabe Y, Nakamoto M, Okazaki K, Tanoue K, Hashizume M: Analysis of endoscopic surgical skill training using the da VinciR surgical system -Comparison between medical doctors and robotics engineers-. The 1st Asian Symposium on Computer Aided Surgery. April 28, 2005, Ibaraki, Japan

掛地吉弘, 小西晃造, 沖 英次, 山本 学, 松本耕太郎, 家入里志, 池辺正彦, 田上和夫, 馬場秀夫, 橋爪 誠, 前原喜彦: コンピュータ支援手術装置による胃切除術の進歩. 第105回日本外科学会定期学術集会. 2005年5月11~13日, 名古屋

家入里志, 小西晃造, 掛地吉弘, 田上和夫, 松本耕太郎, 小林毅一郎, 安永武史, 山口将平, 吉田大輔, 金城 直, 岡崎 賢, 中島秀彰, 橋爪 誠: da Vinciを用いたロボット手術トレーニングの有効性の検討. 第106回日本外科学会定期学術集会. 2006年3月29~31日, 東京

掛地吉弘, 小西晃造, 鈴木薫之, 家入里志, 安永武史, 西田康二郎, 古賀聡, 江頭明典, 徳永えり子, 沖 英次, 森田 勝, 林部充宏, 服部麻木, 田上和夫, 中島秀彰, 鈴木直樹, 橋爪 誠, 前原喜彦: 三次元画像誘導技術を用いたコンピュータ支援手術の開発と展望. 第106回日本外科学会定期学術集会. 2006年3月29~31日, 東京

MRI 下低侵襲手術のための臓器モデリングと多自由度マニピュレータ

分担研究者 藤江 正克 早稲田大学理工学部機械工学科 教授

研究要旨. Open-MRI を用いた手術では、ロボットを用いた低侵襲かつ安全な手術が求められている。しかし、従来の手術ロボットはロボット自体が大きく、かつ自由度も低いため、肺内部や胎児手術など柔軟なアプローチを必要とする対象には適さない。そこで本研究では、軟組織を対象としたモデリングの検討と MRI での駆動が可能な多自由度マニピュレータの開発を行うことを目的とする。本報告では磁場駆動型マニピュレータシステムの提案および試作を行った。本システムは外部磁場発生装置と、先端に永久磁石と磁気センサをもつマニピュレータで構成する。外部磁場発生装置としては、均一な磁場を発生することのできる 2 軸のヘルムホルツコイルを試作し、マニピュレータの試作を行った。さらにマニピュレータ先端の姿勢を測定する磁気センサについて有効性を検証した。今後は試作機の位置制御方法の検討、および臨床にむけたさらなる統合システム開発を推進していく。

A 研究目的

肺や胎児のような軟組織を対象とした手術に対して、Open MRI 下の低侵襲手術が提案されている。Open MRI を使用すれば、患部をリアルタイムで観察しながら治療を行うことができるメリットがある。さらに近年低侵襲手術支援ロボットにより、軟組織に対する安全性を確保しながら低侵襲で手術を行うシステムの研究が盛んに行われている。しかし、肺や胎児の軟組織を対象とした手術は、臓器が損傷しやすく患部までの経路が複雑であることから、従来の金属を用いた剛性の高い機構とは異なった、柔軟な構造を持つマニピュレータの開発が求められている。

そこで本研究では、柔軟な動作でアプローチを行うことが可能な、手術支援マニピュレータの構築を行うことを目的とする。昨年度では、対象である肺のモデリングを行い、手術用ロボットのナビゲーションに必要な基礎的なデータを得た。今年度はマニピュレータの原理の構築および試作を行った。

現在臨床に使われているロボットは鉗子の先端部で多くの自由度を持ち複雑な動きをすることができるが、鉗子の途中の部分は直線状の部材で構成されていてアプローチできる部位が限られている。したがって臓器の深部などの手術は行うことができないという問題がある。

そこで、肺の中などの従来の鉗子では届かない部位にアプローチすることのできる手術用マニピュレータの開発を目的とし、その誘導のための駆動方法を提案する。

このような部位へのアプローチを可能とするためには、従来開発されているような冗長自由度を有した多関節のマニピュレータの延長では、機構が複雑となり、また関節部での引っ掛かり、力の集中が起きてしまうため不向きである。そこでカテーテルの

ような柔軟なチューブ状の構造を持つマニピュレータが必要となる。

柔軟なチューブ状のデバイスの例として、気管支鏡を用いた生検やイレウス管を用いた腸閉塞を改善する手術の際に使われている術具がある。しかし、現在の手術ではこのような気管支鏡やイレウス管のガイドワイヤを誘導するための操作は医師の手元からの押し引きと回転のみによって行われており、胃の出口に当たる幽門を通過させる際などは操作が難しく、時間がかかったり、操作ミスによって臓器を傷つけたりといった安全性に問題があった。

そこで、前述したように先端部を術者が自由に操作することの出来る自由度を有した、カテーテルのような細長いマニピュレータの開発を目標とする。

B 研究方法

B.1 駆動原理

マニピュレータはチューブの先端部に磁石の装着された構造をしており、体外からの磁場との相互作用を利用して体内で駆動する。この概念図を Fig.1 に示す。

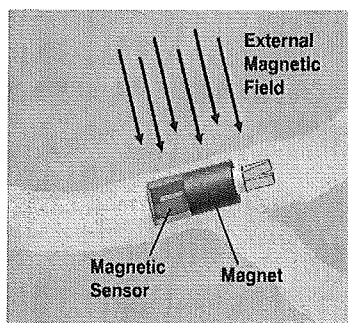


Fig.1 Manipulator Scheme

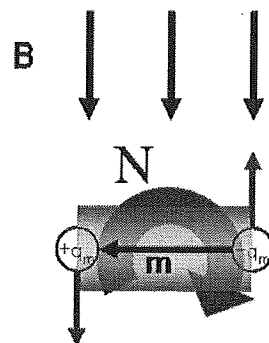


Fig.2 Generated Moment

曲げ方向の動作に関しては、一様磁場内に磁石をおいたときに発生するモーメントを利用して行なう。一様磁場中に磁石があると、磁場に対してモーメントが発生する(Fig.2)。磁石を磁気双極子と考えた場合発生するモーメントは

$$\mathbf{N} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$$

- N**:発生するモーメント
- m**:磁気双極子モーメント
- B**:外部磁場の磁束密度

で表される。この式より磁気双極子モーメントは磁石によって決定される定数であるため、発生するモーメントの方向は外部磁場の強さと方向によって決定される。マニピュレータの直動動作は、マニピュレータ根元からの押し引きとマニピュレータに傾斜磁場をかけた際の磁石の直進方向の推進力によって行なう。本報では曲げ動作についての実証・検討を行なう。本駆動方式の利点としては以下の点が挙げられる。

- ・ 体外からの磁場を利用して操作するために安全性に優れる。
- ・ 単純な構造であり小型化が容易である。
- ・ 制御が比較的容易である。

B.2 マニピュレータシステム

システム概要

提案した制御を行うために、本研究で開発したシステムの概要を Fig.3 に示す。システムは外部磁場発生装置・マニピュレータ・それぞれを制御するコントローラからなる。外部磁場発生装置は向かい合わせたコイルに同じ向きで電流を流すヘルムホルツコイルを多軸配置したものであり、マニピュレータを囲う形で配置されている。この外部磁場発生装置を体外に置き、体内のマニピュレータに磁場をかける。マニピュレータに装着された磁気センサより外部磁場に対するマニピュレータ先端部の角度を検出し、その角度をコントローラに返す。コントローラは目標角度から必要な外部磁場の方向・強さを計算し、外部磁場発生装置のコイルへ流す電流の値を決定する。

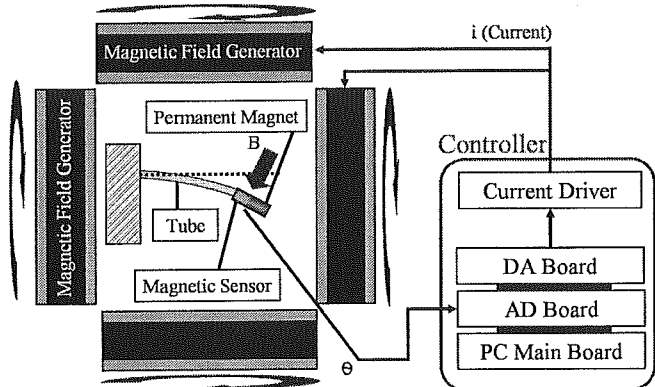


Fig.3 System Component

外部磁場発生装置

曲げモーメントでマニピュレータ先端の角度を制御するためには、外部磁場発生装置は任意の方向に均一性の高い磁場を発生させる必要がある。そこで、Fig.4 のような 3 軸のヘルムホルツコイルを構想した。磁気解析の結果、人体が収まる最低限の大きさである一辺 400[mm]の装置を作った場合、磁場の強さは中央部の 100[mm]四方で平均から±5[%]以内に収まり、方向は中央の 180[mm]四方で±5[deg]に収まることが確認された。さらに磁場の強さは中央部で各軸最大 25[mT]となることが確認された。なお、このときの一様な部分の範囲は装置の大きさが変化した場合も、同じ割合で変化する。実際の手術においては対象とする部位、手技によってマニピュレータを動かす範囲は定まるため、この範囲を外部磁場発生装置の設計の指標とすることが出来る。マニピュレータに 3 軸の動作を可能とするには、現在の姿勢と目標とする姿勢とのなす平面座標を定義し、座標の回転を行えば可能であると考えられる。本報告では動作原理を確認するため、臨床を想定するより小さい実験用の 2 軸の外部磁場発生装置 (Fig.6) を試作し、平面座標での動作の構築を目指した。

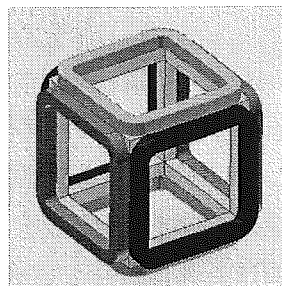


Fig.4 Magnetic field generator

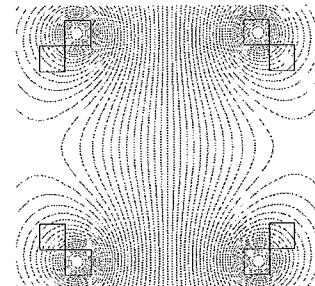


Fig.5 Analysis of magnetic field

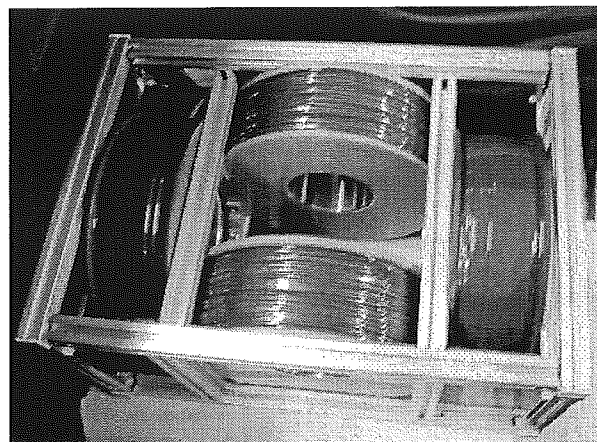


Fig.6 Prototype of 2 axis magnetic field generator

磁気駆動型マニピュレータ

先端部はチューブ、永久磁石および磁気センサからなる。先端に手術具デバイスを付けた際に、その動力伝達を可能とするために、永久磁石は中空のパイプ状のものを用いている。マニピュレータは先端部、磁石部、センサ部、チューブ部の4つに大分される (Fig.7 左図)。それぞれの概要について以下に示す。

先端部

患部を直接扱うエンドエフェクタを装着する。エンドエフェクタとしては、鉗子や穿刺用の針のほか内視鏡のレンズなどが考えられる。これらの駆動を伝達するためのワイヤやトルクチューブを想定している。

磁石部

磁石部は外部磁場との相互作用でマニピュレータ駆動のためのモーメントを作り出す。装着された磁石の強さと外部磁場の強さによって発生するモーメントが決定される。モーメントを大きくするには、出来るだけ強力な磁石であることが望ましい。また先端部の動力伝達のために中空構造の磁石である必要がある。

センサ部

センサには、外部磁場とセンサ本体の成す相対角度が測定可能な磁気センサ (ホール素子) が使用されている。このセンサで読み取った角度を制御に用いる。センサの入力・出力のための導線はチューブ部の内部を通る。マニピュレータの角度は、電流から計算可能な外部磁場の発生方向および、センサからの角度により絶対位置を算出することができる。

チューブ部

チューブ部は人体への圧迫などの物理的影響を出来るだけ少なくし、曲がりやすくするために柔らかいゴムチューブで出来ている。チューブ部の内部には、エンドエフェクタの駆動伝達のためのワイヤやセンサの導線等が通る程度のスペースが必要となる。

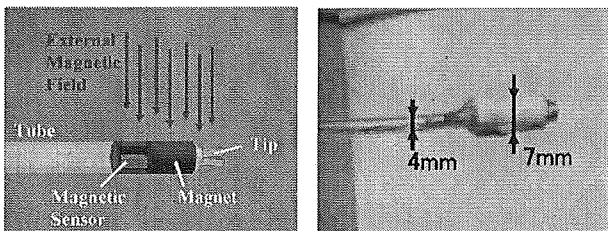


Fig.7 Magnetic driven manipulator

C.研究結果

本マニピュレータは臓器内部や血管内部を移動するため、可能な限り小型であることが要求される。永久磁石としては、小型で外部磁場との相互作用から十分な曲げモーメントを発生できるものを選択した。仕様を Table 1 に示す。また、センサは、同様に小型のもので、十分な出力電圧を得られるものを選択した。仕様を Table 2, Table 3 に示す。チューブは十分に柔らかい、外径 4mm, 内径 2mm のものを使用した。これより、試作したマニピュレータを Fig.7 の右図に示す。センサと永久磁石を内蔵したマニピュレータ先端は直径 7mm になった。

Table 1 Permanent Magnet

材質	ネオジム
形状・サイズ	リング型 $\phi 4 \times \phi 2 \times 5$ mm を 2つ繋げて長さ 10 mm として使用
寸法公差	$(\pm 0.1) \times (\pm 0.1) \times (\pm 0.05 \times 2)$ mm
磁化方向	長さ方向
表面処理	Ni メッキ
表面磁束密度	350 mT
吸着力 (質量)	0.27 kg

Table 2 Hall Element

製造	旭化成電子
型名	HG-106A
寸法	1.5 × 1.5 × 0.6 mm

Table 3 Hall Element (Absolute Maximum Ratings)

項目	定格
制御電圧	8V
許容損失	150mW
動作温度	-40~125°C

この試作機のセンサが検出する角度は、外部磁場だけでなく、駆動用の永久磁石の影響による誤差も含まれる可能性がある。そこで、その永久磁石による誤差を調べるための実験を行った。実験概要を Fig.8 に示す。一定の外部磁場内でセンサの姿勢を変化させ、そのときの出力電圧を測定した。このときセンサの姿勢を三次元位置計測装置で測定し、磁気センサによって出力された姿勢との比較を行なった。

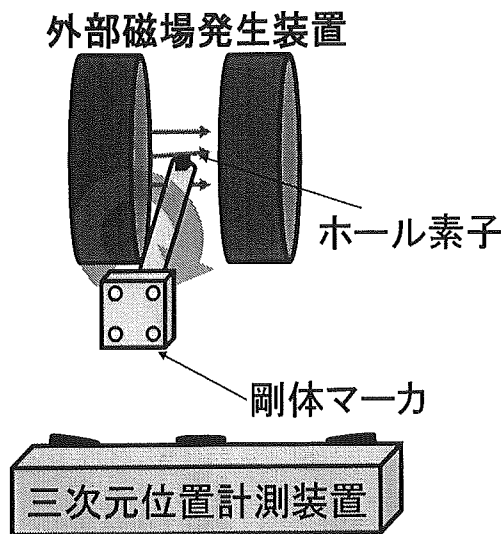


Fig.8 Experimental setting

条件は、以下の2つである。

- 1) 磁気センサのみの場合
- 2) 磁気センサの近くに永久磁石がある場合

この条件において、外界センサの示す角度と磁気センサから計算される角度を静的な状態で測定した。

1) の姿勢と電圧の関係を Fig.9 に示す。横軸が角度、縦軸が電圧を表している。3本のグラフは3軸に配置した磁気センサのそれぞれの出力を表している。各軸ともサインカーブを描いており、軸中心に回転させたときの波形を示している。

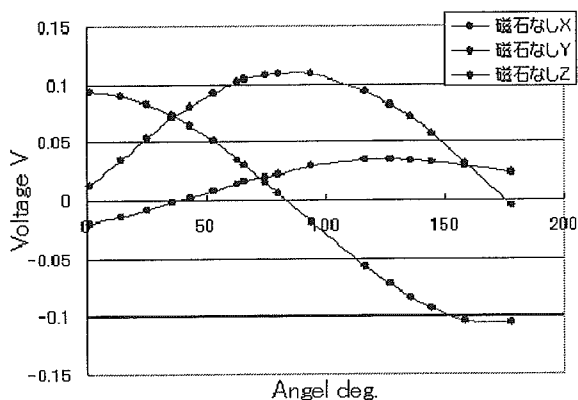


Fig.9 Output of Sensor

3軸のセンサの出力電圧より、磁場をベクトルとして表示し、部材の軸を回転させた角度を測定する。センサによって測定された角度と3次元位置計測装置によって外界から測定された角度を Fig.9 に示す。横軸に外界から測定された角度、縦軸にセンサより測定された角度を示している。これより磁気センサによって測定された電圧から角度が求まることが分かった。さらにその精度は外界センサより測定された値と比較することにより、誤差は最大±3[deg]であることが確認された。(Fig.10)

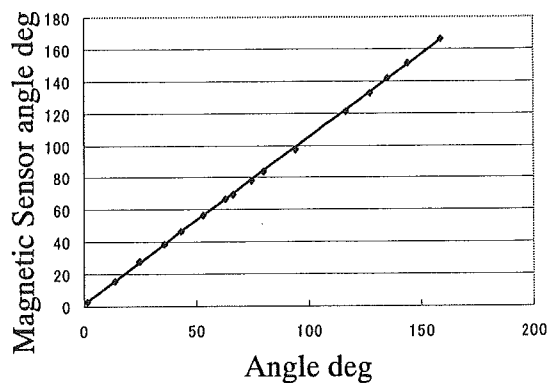


Fig.10 Characteristic of Sensor

次に2) の傍に永久磁石がある場合について述べる。傍に永久磁石がある場合は外部から磁場がかかっていない場合でも永久磁石によって発生した磁場で、センサに初期電圧が発生している。

この状態のセンサを一樣磁場中で回転させたときの出力電圧、および Fig.9 で示した傍に磁石がないセンサ単体の出力電圧の出力波形を Fig.11 に示す。近くに永久磁石がある場合の出力は、近くに無い場合の波形から一定電圧分離れた波形をしている。この電圧が永久磁石による初期電圧であると考えられる。Fig.11 から初期電圧を補正した図を Fig.12 に示す。

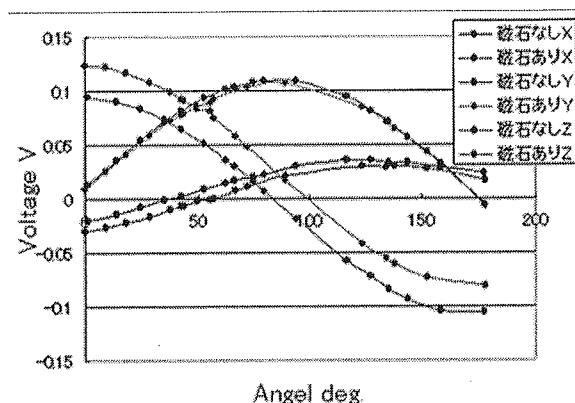


Fig.11 Output of Sensor with Magnet

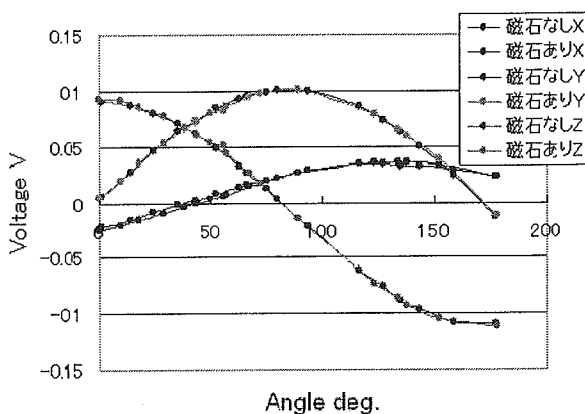


Fig.12 Corrected Output of Sensor with Magnet

Fig.12 よりセンサ単体の場合とセンサの傍に永久磁石がある場合を補正したものは、ほぼ同じ波形を示していることが確認される。このときのセンサの実際の回転角とセンサ出力電圧より求めた角度の関係、および Fig.10 に示したセンサ単体のときの値を Fig.13 に示す。

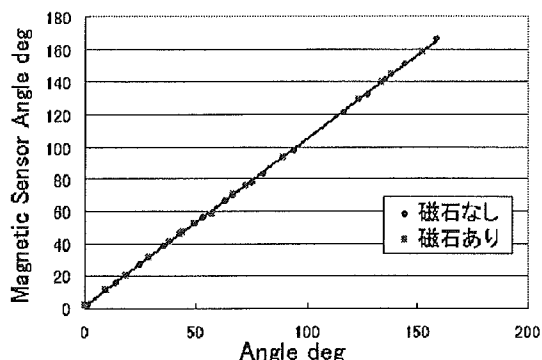


Fig.13 Characteristic of Sensor with Magnet

これより、2つのグラフはほぼ一致していることが確認された。また、センサの傍に磁石があるときの、センサ出力より求めた角度と実際の値とのずれは±5[deg]以内となることが確認された。以上のことから永久磁石による影響を考慮して、あらかじめオフセットをとることで先端部の姿勢を測定できることが確認された。

D.考察

磁気センサによる姿勢の検出が可能であることが分かった。本報告における検討は、理想的な状態においてであるため、システム外部にある磁性体がシステム内部の磁場に及ぼす影響などの外乱が予想される。また、チューブと先端の持つ慣性、臓器からの反力と曲げモーメントを含めた運動方程式の検討などにより、先端角度を制御するための適切な制御方法の構築が必要になると考えられる。

E.結言

本報告では、外部磁場発生装置の磁場を用いて体外から操作可能なフレキシブルなマニピュレータの駆動方式を提案した。更に外部磁場発生装置とセンサを用いたマニピュレータの試作を行い、その姿勢検出が可能であることが明らかになった。今後は試作したシステムを用いて、マニピュレータの制御を行う予定である。

G.研究発表

1.論文発表

なし

2.学会発表

1. 元吉正樹, 藤江正克, “磁気駆動方式による手術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論文集, 05(X)-046, 2005-11

H.知的財産権の出願・登録状況

特になし

新たな手術用ロボット装置の開発に関する研究

分担研究者 石山和志 東北大学電気通信研究所助教授

研究要旨

手術用ロボット機器を安全に使用するためには、ロボット自体の研究に加えて、ロボットの発生する磁界による機器の誤動作を防ぐことが必要である。そのためにはロボットが発生する磁界の正確な計測、さらにはロボットの設置された手術室への磁性体の持ち込みを防ぐためのセンサ技術などが必要となる。そこで本研究では、小型で高感度の磁界センサに関する検討を行い、常温で高い感度を有するセンサを実現するための要素技術を明らかにした。本報告はこれらの成果についてまとめたものである。

A. 研究目的

新たな手術用ロボットの導入においては、MRI、あるいは磁気アクチュエータなど磁気を利用する機器が必要となると考えられている。そのため、手術室に持ち込まれる機器には、磁気装置の誤動作や磁気装置からの漏洩磁界により思わぬ力がかかるなどの事故を防ぐために、磁性体の存在を事前に精密に計測しておく必要がある。しかしながら従来このような用途の検査機器は開発されておらず、新たなセンサの開発が必要となる。東北大学電気通信研究所においては、これまで微小な磁界を計測するためのセンサの開発を行ってきており、そこで蓄積された知見を生かして、新たな手術室に持ち込む機器の検査用のセンサシステムを実現するための検討を行った。具体的には、磁性体薄膜に高周波電流を通電した際の高周波電気抵抗が外部磁場に依存して変化することを利用したセンサに関して詳細な検討を行った。

B. 研究方法

高透磁率磁性体に高周波電流やパルス波を直接

通電し、外部磁界による透磁率変化を介し、表皮効果および自然共鳴によりインピーダンスが大きく変化することを利用した磁界センサは、GMIセンサあるいは高周波キャリア型磁界センサと呼ばれ、高感度化の研究および産業応用が議論されている。このセンサ素子の磁界検出の感度限界は熱による磁化のゆらぎで決定され、その値は室温で 10^{-13} T 台に達するとの報告がある。この磁界センサの高感度化においては、微小信号検出回路の開発および検出回路を考慮した素子設計するとともに、センサ素子自体の感度を高めることが重要となる。高周波キャリア型薄膜磁界センサを用いた交流磁界の検出回路として搬送波抑制回路が提案されており、搬送波の位相雑音を熱雑音以下に低減させることで、501 kHz において 1.7×10^{-12} T (1.7×10^{-8} Oe) の微小交流磁界の検出を実現している。

本報告では、交流磁界計測感度を極限まで高め、高いSN比を得ることを指向し素子の設計をした。設計には、バイアス磁化率の理論、LLG方程式、有限要素法による電磁界解析などを用い、最適なセンサ素子形状を検討した。ここではセンサ面積を $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ と固定し、その中につづら折れ

構造のセンサ素子を作成した場合の最適素子断面形状を検討した。

(倫理面への配慮)

現在の研究は基礎研究の段階にとどまっており、人体あるいは動物を利用した実験の予定はないため、倫理面への特段の配慮は行っていない。また、実験の今後の発展を考えても、我々が医学的実験を行う予定はなく、倫理面の配慮が必要な実験を行う予定はない。

C. 研究結果

試作したセンサの構造図をfig.1に、全体写真の一例をfig.2に示す。Fig.2に示すセンサは、つづら折れ構造が10回のもので、線幅200ミクロン、線間隔30ミクロンである。この素子を構成する磁性薄膜はCoZrNb合金であり、半導体微細加工技術と同様の手法によりガラス基板につづら折れ構造を形成した。さらに電極としてCu(銅)薄膜を形成した。

このセンサに数十～数百MHzの高周波電流を通電すると、磁性薄膜材料の透磁率に依存して電気抵抗(高周波インピーダンス)が変化する。これを利用したセンサが、高周波キャリア型磁界センサであり、室温で動作する磁界センサの中では最も高感度の磁界センサとして知られている。磁界検出方法をfig.3に模式的に示す。センサに交流磁界が与えられるとそれに伴ってインピーダンスが変化することから、検出端にスペクトラムアナライザを接続し出力電圧の周波数特性を計測すると、通電電流の周波数をキャリア周波数として与えた磁界の周波数で振幅変調された電圧が得られる。これはラジオ放送におけるAM変調と同じものであり、容易に外部に磁界計測結果を出力できる。

このセンサの感度を高くするためには、センサのインピーダンスが外部から与えた磁界に対して敏感に変化することが必要である。Fig.4は外部から与えた磁界とセンサのインピーダンスの関

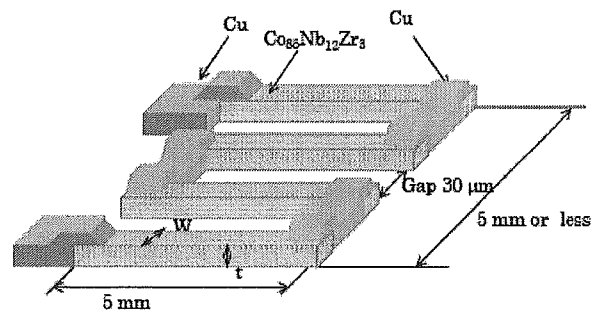


Fig.1 センサの構造図

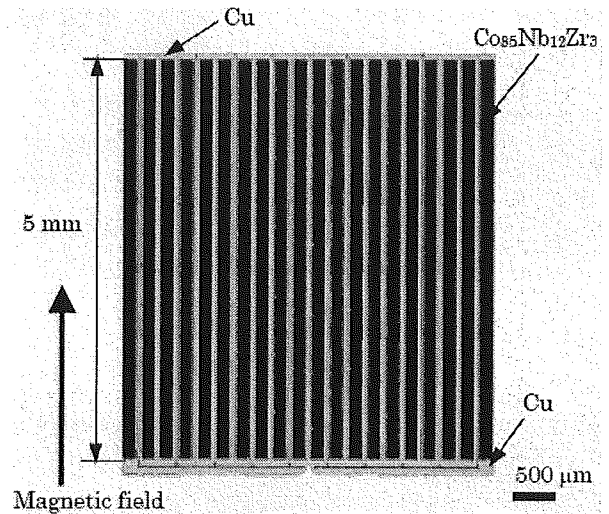


Fig.2 センサ全体図(写真)

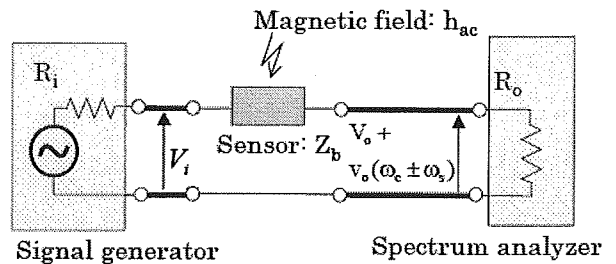


Fig.3 磁界検出回路

係を計測した結果である。磁界を与えない場合には約210Ωであったインピーダンスは約70eの磁界を与えた場合には約470Ωまで増加している。センサとして用いる場合には、より小さな磁界を計測することが必要であることから、このセンサは約60eの直流バイアス磁界を与えたうえで、微小な磁界が与えられると約360Ωを中心として大きくインピーダンスが変化することがわかる。すなわち同図中に実線で示した直線の傾きが大き

いほど、感度の高いセンサであるといえる。

そこで、この傾きを注目要素として電磁界シミュレーションならびにセンサの試作をおこない、傾きが最も大きくなるセンサ構造を探索した。その結果、Fig.5に示す様に、線幅が200マイクロンの際に最も大きな出力が得られることが、実験ならびにシミュレーションから明らかとなった。このことから、高感度磁界センサを実現するためのセンサ構造の設計指針が明らかとなった。

D. 結論

室温で動作する超高感度磁界センサは、手術用ロボット開発のために必要不可欠であると考えられる。本年度の結果により、そのセンサを開発するための構造設計に、シミュレーション技術が適用可能であること、さらに高いセンサ出力を得るための最適なセンサ構造が明らかとなった。本研究の最終的な目的の一つである、手術室への磁性体の持ち込みを発見するためのセンサを実現するには、本年度の研究成果をさらに推進し、高感度のセンサを組み込んだ検出システムを開発することが必要であり、そのための大きな成果が挙げたものと考えている。

E. 研究発表

論文発表

1. S. Yabukami, H. Mawatari, N. Horikoshi, Y. Murayama, T. Ozawa, K. Ishiyama, K. I. Arai, " A design of highly sensitive GMI sensor," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol.290-291, pp.1318-1312, (2005).
2. S. Hashi, Y. Tokunaga, S. Yabukami, T. Kouno, T. Ozawa, Y. Okazaki, K. Ishiyama, K. I. Arai, "Wireless motion capture system using magnetically coupled LC resonant marker," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol.290-291,

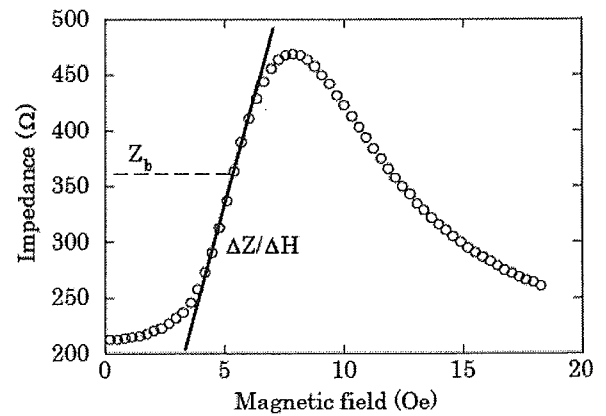


Fig.4 インピーダンスの外部磁界依存性

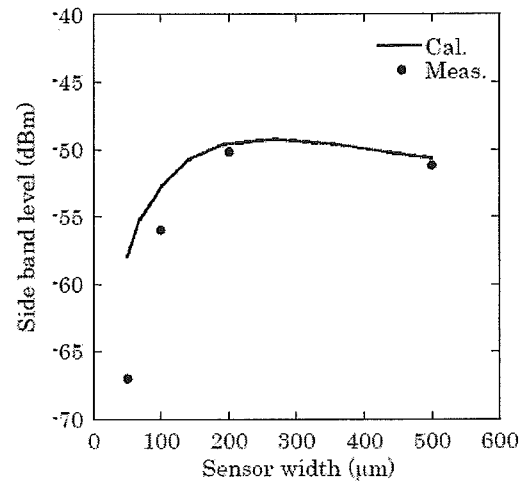


Fig.5 センサ線幅と出力の関係

pp.1330-1333, (2005).

3. 堀越直、藪上信、村山芳隆、小澤哲也、石山和志、荒井賢一、「振幅変調による高周波キャリア型薄膜磁界センサの設計」、日本応用磁気学会誌、vol.29, pp.472-476, (2005).
4. 小澤哲也、横田周子、堀越直、藪上信、石山和志、荒井賢一、「高周波キャリアを用いた位相検出型薄膜磁界センサの開発」、日本応用磁気学会誌、vol.29, pp.663-666, (2005).
5. 小澤哲也、馬渡宏、藪上信、石山和志、荒井賢一、「高周波キャリア型薄膜磁界センサの位相差検出による交流磁界測定装置の開発」、日本応用磁気学会誌、vol.29, pp.831-837, (2005).
6. Shuichiro Hashi, Yuuki Tokunaga, Shin Yabukami, Masaharu Toyoda, Kazushi Ishiyama, Yasuo Okazaki, Ken Ichi Arai,

"Development of Real-Time and Highly Accurate Wireless Motion Capture System Utilizing Soft Magnetic Core," IEEE Trans. Magnetics, vol.41, No.10, pp.4191-4193, (2005).

F. 知的所有権の取得状況

なし

厚生労働省科学研究費補助金（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

軟性内視鏡的構造の手術器具の開発評価に関する研究

分担研究者 雨宮隆太 茨城県立中央病院・茨城県地域がんセンター長

研究要旨 体内深部や狭小領域における外科手術の基本的な手技である counter traction の原理を可能にする軟性内視鏡的手術機器の開発コンセプトが胸部外科手術の侵襲性の軽減・胸腔鏡下手術の適応拡大に寄与するかを検討した。本コンセプトの元に開発された内視鏡的手術機器を用いて動物実験を行い、従来の鏡視下手術に比べて手技の確実性・安全性の向上を得ることができ、開発コンセプトの妥当性が確認出来た。本機器の使用により胸部外科手術のデメリットである侵襲性の軽減、あるいは到達困難な狭小領域の組織切離の可能性が示唆された。また手技の面から臨床応用に必要な開発・改善すべき周辺機器についても幾つか上げることができた。

A. 研究目的

近年、手術機器の開発により、小さな手術創からでも十分な術野の確保が可能となり、さらには鏡視下手術が開発され手術創はますます小さくなる傾向にある。手術創が小さくなることで、患者さんの術後の痛みは軽減されている。これをもって低侵襲手術と呼ぶ場合もあるが、実際には身体機能全体に対して低侵襲でなければならない。たとえば、微小肺癌の手術に於いては切除範囲の縮小であるとかリンパ節郭清の省略等によって手術の侵襲は軽減される。一方、開胸下に行う左肺発生進行肺癌の前縦隔リンパ節郭清は創を大きくするか、別に新たな切開創を加えない限り到達が困難である。また、現在行われている胸腔鏡補助下肺切除術（VATS）は縦隔リンパ節郭清が開胸下郭清に比べ不十分似なることは否めない。当然これらの手術範囲を予測するには術前・術中の画像診断の正確性の向上や術中迅速病理診断の活用等が必要となって

くる。低侵襲の体腔鏡下術中操作の工夫は臓器や周辺組織の切離を最小限に抑える努力が必要になる。このことは術野の確保という点に於いては矛盾することになる。手術用のロボットが開発され、この点に関しても解決が図れるかと思われたが、本質的には従来の鏡視下手術の闕を出ていないのが現状である。これは counter traction の原理が使いにくいこと、狭小領域では手術の“場”を捉えにくいことに起因している。

軟性内視鏡による各種手技の発展は目覚ましく、従来は外科手術でしか対処出来なかったような病態・疾患に対してもその適応は拡大している。これは軟性内視鏡の進歩により従来は到達できなかった部位への挿入が可能になったことや、内視鏡に用いる鉗子の進歩によるものである。現状では内視鏡を通しての鉗子の挿入は2本が限度であり、鉗子は直線的にしか動かすことが出来ない。しかし、軟性内視鏡と同様の可動可能な鉗子装置が開

発された場合、内視鏡下の処置は格段に進歩するものと予想される。この種の手術機器の開発は、先に述べた外科治療に於ける術野の展開の問題・侵襲性の問題が解決されると思われる。このような開発コンセプトの有益性・妥当性の検討を手技の面から分担研究の目的とした。

B. 研究方法

2本の細径軟性内視鏡ユニット（子ファイバー）の挿入可能な太径軟性内視鏡（親ファイバー）を使用し、豚の胃粘膜切除、鏡視下胆嚢摘出術を施行する。従来の手術術式と対比し、本手術機器の開発の妥当性・有用性・発展性を検討した。本ユニットでは3本の軟性内視鏡の操作が必要のために3人の術者の共同作業となった。その結果から、呼吸器内視鏡領域への適応性を検索する。

（倫理面への配慮）

実験に於いては医学生物学領域の動物実験に関する国際原則を遵守した。

C. 研究結果

内視鏡下に胃粘膜切除を行う際、従来の鉗子は直線的な動きしか出来ないため鉗子の方向を変えるにはファイバーそのものを動かす必要がある。鉗子が2つ使える内視鏡は有用ではあるが一方の鉗子の方向を変えた場合、他方の鉗子も同方向に動いてしまうので2つの鉗子をシンクロした形で使用することが困難であることは現状の内視鏡の使用経験で判っていた。

開発された内視鏡ユニットにおいては子ファイバーから鉗子の挿入が可能で、2つの子ファイバーは独立して動かすことが可能であった。片方の鉗子で粘膜を把持し、他方の鉗

子で切離していくという動きは撮子と鉗による粘膜の切離をイメージさせる。このことにより、従来は粘膜切除が困難な部位での切除も可能になると思われる。ファイバーでなく、ファイバーと同様の運動機能を持つフレキシブル中空管ないしは鉗子の開発も一つの方法であり、実際試作された鉗子を使用して、有用性が証明されている。さらに極細内視鏡機能を併せ持った鉗子の開発が可能であればより有用と思われる。粘膜切除が開腹手術と比較し、低侵襲であることは誰もが認めることであり、本術式の適応拡大は患者にとっては福音と言える。

鏡視下手術に於いても従来の剥離鉗子は直線の長い金属を用いて作成されており、先端部の角度を自由に変える構造を持っていない。そのため、電気メスによる切離の際、鉗子に接する周囲組織を同時に通電し傷つけることがある。挿入した鉗子の挿入角度を変更することで、周囲組織に接することなく鉗子先端を目的部位に進めることが可能となったことでこの様な損傷が回避可能となった。しかし、機器の操作性には難があり、3名の術者・助手による手術がスムーズに行うには、各々ファイバーの操作修練が必要である。但し、軟性内視鏡的な手術機器、特に内視鏡的な動きが可能な鉗子の開発は従来の鏡視下手術の安全性・確実性をより向上させることが予想される。

さらに、挿入可能な鉗子の数が増え、その鉗子の把持力が強化されることで現在必要な処置用のトロッカーの挿入が不要となり、開発中の軟性内視鏡的構造を有する手術機器のみを体腔内に挿入することですべての手術操作が可能になると思われた。

D. 考察

内視鏡下手術が従来の開胸・開腹手術手技と最も異なる点は“場”の三次元化の困難性にある。正確な場を作るには counter traction の原理が必要であるにもかかわらず、内視鏡下手術では正確に反対方向へ牽引することが困難であった。我々が将来計画している左胸郭からの前縦隔のリンパ節郭清などは周囲臓器に挟まれた狭小的領域であり、内視鏡の太さが場を形成することになる。このような場での counter traction は鏡視下手術で組織を切離する際に多用される blunt dissection に最も有用になる。

今回使用させていただいたユニットと従来の軟性内視鏡下処置、体腔鏡下手術の最も大きな違いは処置具の動きにある。従来の鏡視下手術では鉗子は直線的な動きしか出来なかったが、本ユニットでは上下左右の動きが可能になり、まがりなりにも手術手技の基本である counter traction が可能になってきた。これにより、切除対象が立体的に捉えられるようになってきた。

2本の子ファイバーから挿入した鉗子を独立して動かし、鉗子の屈曲が可能となったことから周囲臓器を過度に圧排・剥離することなく目的臓器に達することが可能となり、狭小領域への鉗子の挿入も容易となった。2本の上下左右の動きが可能な鉗子の使用は2（～3）名の操作術者の協調作業ではあるが、開腹・開胸手術同様に摂子と鉗を持って剥離や切除を行うことと相通ずるものである。本ユニットは、狭小部位において開腹手術や開胸手術と同様の手術が可能になると思われる。狭小部位での手術操作を可能にするには親ファイバーの細小化、子ファイバーから挿入可能な鉗子の開発が必要である。但し、把持力

の強い鉗子類はある太さ、大きさ、追従力が必要であり、親ファイバー自体の狭小化、鉗子孔の狭小化、機器の破壊性の減少を考慮すると、子ファイバーを用いずにファイバー類似の運動性を持つフレキシブル中空管を作成することも考慮される。このフレキシブル中空管は30年前に気管支造影に使用されていた同様の管が参考になり、数mm大の鉗子の挿入や外径3.5mmの極細ファイバースコープの挿入観察も可能となる。また親ファイバー（根部）、子ファイバー（あるいはフレキシブル中空管）（中部）、鉗子やメス（梢部）と操作のアームを3つに分けると、把持してからの細かい操作は根部が最も優先され且つ有効である事が解った。これにより、根部の力を梢部に伝える中部の頑丈性が要求される。さらに同時に挿入可能な大きな鉗子の数・種類を増やすことにより、手術操作は一層容易かつ確実にすることが予想される。

また、親ファイバーの観察画像を広域視野に切り替え可能にすることで、子ファイバーの指向性の認識が可能となり、手術操作がより容易となると考えられた。

動物実験を通じ、内視鏡的構造を有する手術機器の開発というコンセプトが手術の安全性・低侵襲性に寄与することが今回の検討で確認することができた。

E. 結論

内視鏡的構造を有する手術機器の開発により、現在行われている体腔鏡下手術を発展させた低侵襲手術を可能にし、胸部外科領域では胸腔鏡下手術の適応拡大と縦隔鏡の治療性手技の拡大に寄与すると思われ、本機器の開発コンセプトが妥当であることが確認できた。たま、本機器と周辺機器の開発・改善は外科

手術のデメリットである侵襲性の軽減という点で外科手術に対する一般的なイメージを一変させる可能性を秘めていると思われた。

G. 研究発表

論文発表

- 1) 清嶋護之、朝戸裕二、鏑木孝之、橋本幾太、内海啓子、雨宮隆太：当院における気道異物症例、気管支学、27 (7); 529 -532,2005.
- 2) 清嶋護之、朝戸裕二、佐藤始広、鏑木孝之、雨宮隆太：Virtual bronchoscopy の臨床応用、呼吸器科、8 (6); 533 -537, 2005.
- 3) 鏑木孝之、雨宮隆太：気管支鏡所見の捉え方。気管支学、27 (5); 395 -400,2005.

学会発表

- 1) 朝戸裕二、清嶋護之、鏑木孝之、黒田久俊、内海啓子、奥村敏之、横瀬智之、井村穂二、雨宮隆太。術前化学放射線療法を行ったN2肺腫の3切除例。第22回日本呼吸器外科学会総会、京都、6月2～3日、2005
- 2) 内海啓子、鏑木孝之、黒田久俊、戸川眞一、清嶋護之、雨宮隆太。感染性胸膜炎に対する局所麻酔下胸腔鏡検査について。第28回日本呼吸器内視鏡学会総会、新宿、6月9～10日、2005
- 3) 雨宮隆太：気管支鏡所見の基本的な見方、考え方。第112回日本呼吸器内視鏡学会関東支部会 特別講演、新宿、3月19日、2005

H. 知的財産権の出願・登録状況

なし

「新たな手術用ロボット装置の開発に関する研究」

分担研究者 土田 敬明 国立がんセンター中央病院内視鏡部医長

研究要旨 手術用ロボット装置における画像ガイド下での手術操作方法を確立するために、内視鏡下に実施可能な画像ガイド下での手術操作方法の検討を行う。手術用ロボット装置では、CT、MRI、超音波断層装置などの画像ガイド下で操作することでより精度の高い手術を行うことが期待される。画像ガイド下では、病変の進展範囲や周囲組織との関係をより正確に把握することが可能である。現状では3D-CTによるリアルタイム画像ガイドは困難と考えられるため、通常のリアルタイムCT(二次元画像)と3D-CTの静止画像を組み合わせることで内視鏡下に器具をターゲットに誘導させる方法の検討を行った。3D-CTの静止画像を組み合わせることにより器具の誘導は容易となった。

A. 研究目的

手術用ロボット装置における画像ガイド下での手術操作方法を確立するために、内視鏡下に実施可能な画像ガイド下での手術操作方法の検討を行う。手術用ロボット装置では、CT、MRI、超音波断層装置などの画像ガイド下で操作することでより精度の高い手術を行うことが期待される。画像ガイド下では、病変の進展範囲や周囲組織との関係をより正確に把握することが可能である。画像ガイド下でのロボット操作には3次元的な空間把握が安全確保の点からも重要であることは論を待たないが、末梢気管支

の3D-CT再構成は困難とされ、現時点では、一部の気管支で6-7次気管支の描出が可能になっているにすぎない。また、娘枝の描出はほとんどできていない。本研究では、3D画像ガイドを実現するために末梢気管支の3D-CT再構成を実現し、これを用いた画像ガイド下での器具の操作方法を確立する。

B. 研究方法

リアルタイムCT画像ガイド下における内視鏡装置等の操作を確実にするために、気管支の3D-CT再構成画像を併用した操作方法の検討を行っ