

図5 自由度配置

### B-3-2 RPT システムの改良

2台のプロジェクトの投影部間水平方向の距離は、人間の平均的な眼間距離である65mmとしなければならない。また、人間の視野は水平方向に広い横長の形であるため、投影する映像も同様に横長であることが望ましい。本試作機で用いたプロジェクト(昨年度試作機は PLUS V-1080、本年度改良機では東芝 TDP-FF1A) の場合、左右に横向きに並べる配置では投影部間の水平方向の距離が眼間距離より大きくなってしまい、昨年度の試作で採用した縦向き配置では投影映像が縦長になってしまう問題点があった(図6)。そこで図7に示されるように2台のプロジェクトを上下に配置し、ハーフミラーを交差させて置くことで上記の問題を解決した。プロジェクトを上下に配置する場合、プロジェクト間の上下方向の距離が問題となる。上下間の距離が近いほど、要求されるハーフミラーのサイズは小さくなり、装置をコンパクトにすることができる反面、ハーフミラーを透過した光がもう一方のプロジェクトに当たった反射光の影響

響が大きくなる。よって、反射光の影響という観点からは上下間の距離は装置の大きさの許す限り離して配置するのが望ましい。しかし、左右のハーフミラーを交差させた配置であるため、左右それぞれのハーフミラーにプロジェクトから映像を投影できる範囲は限られている。上下間の距離が遠ければ、投影映像がもう一方のハーフミラーの領域に入り、その結果画像が途切れることになるため、上下間の距離には上限がある。この上限はプロジェクトの水平画角によって求めることができる。X'tal Scopeの頭部では以上の点を考慮し、画像の途切れない範囲でできるだけ離れた位置に上下のプロジェクトを配置している。また、反射光の影響は吸光材として黒色のフェルトを反射部に貼ることによって軽減が可能である。

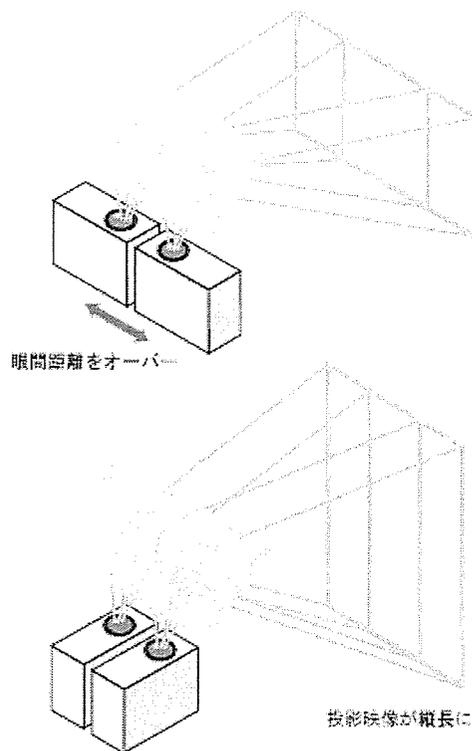


図6 プロジェクトの配置

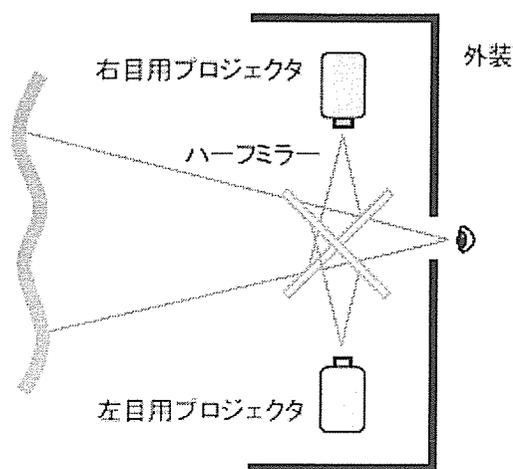


図7 改良後の光学配置

### B-3-3 RPT 光学系改良

RPT 光学系はオプティカルシースルー HMD 光学系とほぼ同じ構造を持っている。しかし従来のオプティカルシースルー HMD 光学系と異なり再帰性反射材をスクリーンとして用いることで様々な利点がある。まず、再帰性反射により、高い輝度を得られる。画像投影部の開口径を光量の許す限り絞り込むことで、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である点も大きな特徴である。また、再帰性反射材が塗布可能なすべての物体をスクリーンとして利用可能なため非常に軽量なディスプレイを実現可能であり、手などの物体では投影光は散乱し、スクリーン面では高い輝度で反射することにより、適切な遮蔽・前後関係を保持した投影が可能であるということである。

しかし、この光学系ではハーフミラーがあるため完全な開放型とは言えず、視野角もハーフミラーの範囲に制限される。視野角を広くするためにはハーフミラーを大き

くしなくてはならず、開放感が損なわれることになる。またハーフミラーには外部からの光が映りこむ、光損失が大きいという欠点もある。

そこで開発されたのが X'talVisor 光学系である(図8)。X'talVisor は前項の RPT 光学系におけるハーフミラーを小型の全反射ミラーに変え、投影レンズを通して収束した光線をスクリーンに反射させる。十分に小型のミラーを用いることによってほぼ障害物のない状態で画像の観察が行える。つまり、X'talVisor はフルオープン型の HMP (Head-Mounted Projector) であるといえる。

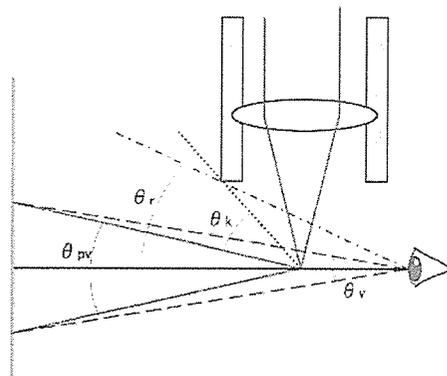


図8 X'talVisor 光学系の概略

X'talVisor 光学系のまず改善されるべき課題として実視野角向上の必要性がある。試作した X'talVisor の実視野角はおよそ 26[deg] (水平) 20[deg] (垂直) である。

ヒトの視覚特性から一般に、通常の視覚ディスプレイでは水平視野角 30[deg] 前後から臨場感を感じ始め、100[deg] 前後ではほぼ最大になると言われている。また、主観的な予備実験ではあるが、垂直実視野角が 15[deg] 前後以下になると著しく視野が限定されると感じ始めるとの実験結果を得て

いる。

試作した X'talVisor は視野の限定感の限界はクリアするものの臨場感の提示には視野角の向上が必要である。また、X'talVisor を実体形状ディスプレイに使用した際、頭部を動かさない状態での提示にはある程度の実用性が確認できたが、ふと頭部を移動した際に観察物体が AR 画像の提示される視野から外れ、AR 画像が途中で切れるという著しい違和感が生じ、実用の際の大きな問題となるであろうことが確認された。

また、頭部に装着するという形状上の制約から光学系のレンズホルダ等の機構が光学系に干渉する、いわゆるケラレの問題が設計上生じることも確認された。(図9) これは垂直方向の実視野角を損なう要因となる。

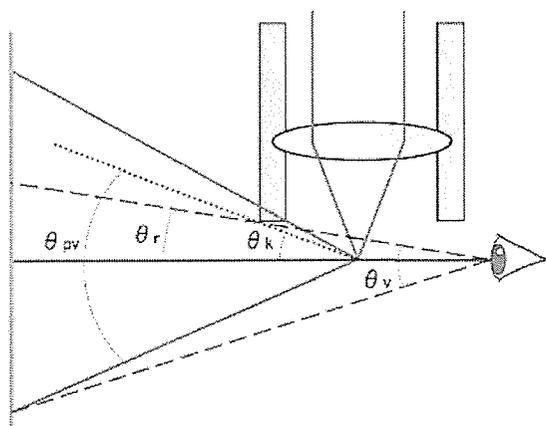


図9 ケラレの発生

我々は形状提示型あるいは触覚提示型のディスプレイと X'talVisor を組み合わせることにより高度な実世界指向型ディスプレイシステムの実現を目指す。

#### (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 X'tal Scope の実装

B-3-1, B-3-2 の内容に基づき X'tal Scope システムを実装した。改良後の緒元を表1にまとめる。また、実装されたシステムを用いてトルソに骨格を投影された様子を図10に示す。

表1 X'tal Scope 緒元

頭部可動範囲	140x140x45[cm]
頭部ピッチ角	+60 ~ -90[deg]
水平画角	30[deg]
垂直画角	22[deg]

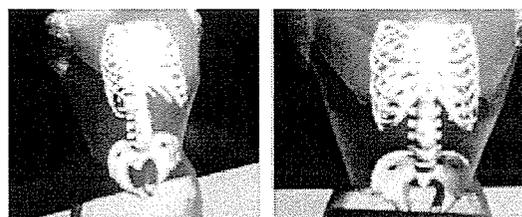


図10 骨格モデルの投影

本手法の最大の特徴は両眼立体視ができる点である。両眼立体視においてクロストーク（左目に右目用の画像が入り、右目に左目用の画像が入る現象）の有無は自然な立体視に大きな影響を及ぼす。そこでクロストークが生じていないかどうかの評価を行った。

左右の目にそれぞれ“L”、“R”の文字を

提示した写真を図 1 1 に示す。左目には“L”、右目には“R”の文字しか見えておらず、クロストークがほとんど生じていないことが確認できる。これによって、本手法を用いて自然な立体視が可能であることが示された。

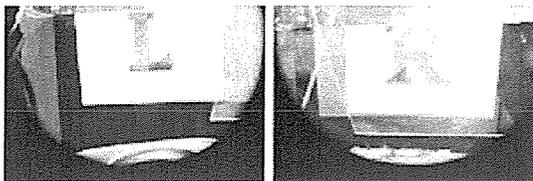


図 1 1 クロストークの評価

### C-2 X'tal Visor 光学系改良の検証

前章で論じられた視野角改善のための手法について本章で検討を行う。検討を行うためのベースとする X'talVisor 光学系のパラメータ等を、試作機を基に以下のとおり設定する。

画像素子は 0.7 型 (14.224[mm] x 10.668[mm]:対角 17.78[mm])とし投影レンズはアロマティックレンズの平均的な値として焦点距離 30[mm]、EFL・BFL=8[mm] (有効焦点距離-バックフォーカス)、とし、厳密な議論を要する部分では実パラメータを用いるとする。レンズホルダは開口径 22[mm]、ホルダ径 30[mm]とし、眼とミラー間の距離は 20[mm]と設定する。

#### C-2-1 レンズホルダ部の小型化

図 2 からケラレの問題を解消するにはレンズホルダの端面とレンズ表面の距離を可能な限り短くするなどのレンズホルダの小型化が一義的な改良方法である。ただし、レンズ径の小型化は投影視野角の減少を意味する。

改良前の FEL=17[mm](フランジバック)は 17[mm]である。これを仮に 0[mm]とすると実視野は 42[deg]と大きく改善される。また、本手法によって改悪する要素は皆無である。以降は、実際的な値として FEL=2[mm]まで本改良がなされており、さらなる改良を行うとの前提で以降の議論を行う。

#### C-2-2 レンズ・画像素子の大型化

図 1 2 に示すようにレンズ・画像素子の径の大型化によって投影視野角は改善される。

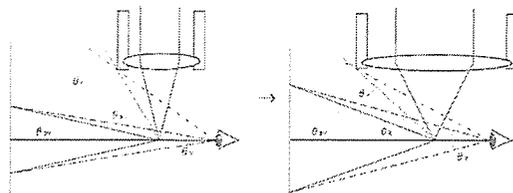


図 1 2 レンズ・画像素子の大型化

本改良の例として投影レンズ・ミラー間の距離 (焦点距離に等しい) を変えず、水平視野角の目標として 45[deg]を設定すると、レンズの有効径は 31.7[mm]以上、画像素子は 26[mm]x20[mm]以上である必要がある。実際的な値としてレンズ径を 40[mm]とするとケラレは生じないが、実視野角は 45.8[deg]x34.5[deg]となる。この際、眼とミラー間の距離は 25[mm]となり、輝度の低下の問題が生じる。また、装置全体の大型化・重量化などの問題も生じる。

#### C-2-3 レンズの短焦点化

図 1 3 に示すようにレンズの曲率を増すなどの短焦点化によって投影視野角は改善される。

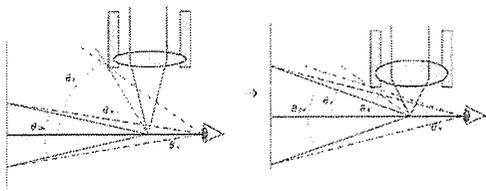


図 13 レンズの短焦点化

本改良の例として水平視野角の目標として45[deg]を設定すると、投影レンズの焦点距離は17.2[mm]となる。一般に径が大きく焦点距離の小さいレンズでは収差の少ないものの製作が困難である。また、レンズの厚みによりミラーとの干渉が生じる場合がある。また、実際的な値として口径25[mm]、焦点距離25[mm]の平凸レンズを例に計算すると、実視野は31.5[deg]x23.6[deg]となる。

#### C-2-4 球面ミラーの利用

図14に示すように平面ミラーの代わりに球面ミラー（たとえば凸面鏡）を用いることで投影視野角は改善される。

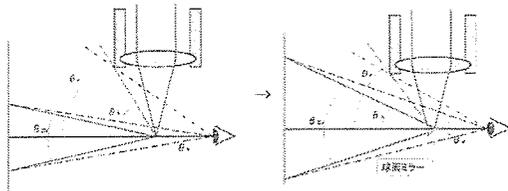


図 14 球面ミラーの利用

前節と同様、水平視野角の目標として45[deg]を設定すると、ミラーの曲率半径r[mm]、投影レンズー曲面ミラー間距離d[mm]の間に

$$d = 0.55r + 30$$

の関係が成立する。一例としてミラーの曲率半径wを20[mm]、投影レンズー曲面ミラー間距離を41.1[mm]とすることができる。この際の球面ミラーの大きさは11.1

[mm]となり、これは球面ミラーによる視野の障害が問題となる大きさである。また、球面ミラーでは非点収差が大きな問題となる。本光学系で用いる画像素子の解像度を800x600とすると、許容錯乱円径は0.01778[mm]と算出されるが、本光学系に設定されているパラメータを基に算出すると2点の像のずれは2.21[mm]となり、問題外の大きさのボケが発生することがわかり、本方式はこのままでは実現不能である。

#### C-2-5 レンズ系（複数レンズ）による短焦点化

図15に示すように投影レンズを複数連続して用いることにより、合成焦点距離が短くなる。また、光線が集まる位置が投影光学系に近くなり、投影視野角が改善される。また、2枚目以降のレンズは小さくすむので実視野角の改善も期待される。

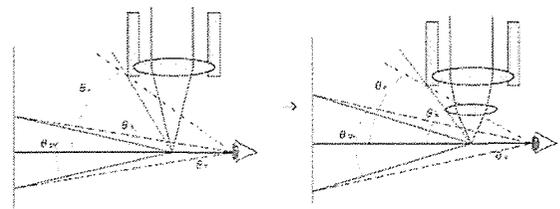


図15 レンズ系による短焦点化(レンズ2枚の例)

例として投影レンズを2枚用いて光学系の短焦点化を行う場合を考える。シミュレーションの一例として1枚目の投影レンズの焦点距離を35[mm]、2枚目の投影レンズの焦点距離を20[mm]、2枚のレンズの主点間距離を15[mm]とすると、2枚目のレンズの必要有効径は10.2[mm]となり、実際的な値として2枚目のレンズホルダの径を15[mm]、2枚目のレンズの主点からレン

ズホルダ端の距離を 5[mm]とすることでケラレの生じない設計が可能である。この場合の実視野角は 44.7[deg]x33.5[deg]となる。

### C-2-6 グリンレンズを用いた光路延長

レンズ・ミラー間を広げるとレンズの焦点距離  $f$  が大きくなることにより、光線の集まる角度が小さくなってしまふ。そこでレンズの焦点距離は変えずにレンズ・ミラー間の距離を広げるようなりレー光学系を挿入する手法を提案する。そのような光学系としてグリンレンズ (GRIN lens = GRadient INdex lens) を用いている (図 16)。

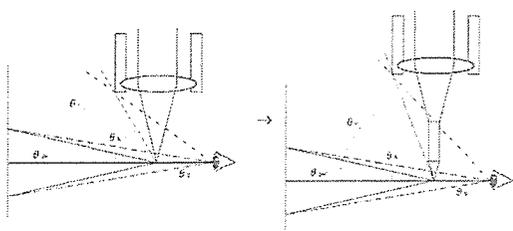


図 16 グリンレンズを用いた光路延長

りレー光学系としてグリンレンズを選択した理由は取り扱い、設計の容易さ、非常に小型である点などが上げられる。実際的なシミュレーションの一例としてΦ 2.5[mm]長さ 6.5[mm]のグリンレンズを用いた。これは既存のグリンレンズの中から目前に配置されても気になりにくいことを考慮し選択したものである。

グリンレンズの問題点は画角 (相当) の狭さであり今回上記のグリンレンズの画角を実測した結果、10.9[deg]であった。この値を基に算出した結果、実視野角は 6.30[deg]x8.40[deg]となった。

実際にはグリンレンズにより、上方

19.5[deg] ~ 29.8[deg] の部分の水平 3.58[deg]相当の実視野が阻害されることになるが、これは小さく、またレンズは透明であり細い、眼との距離が短いため眼の調節に合焦が不可能などの理由でそれほど邪魔にはならないと考得られる。また、実際に試作した結果、主観的ではあるが、それほど邪魔にはならなかった。

## D. 考察

### D-1 X' tal Scope システムの検証

投影実験から、クロストークのない自然な立体視が可能であることが実証された。

実証実験によってハーフミラーの選択の問題が浮上した。ハーフミラーは従来手法では輝度の最も高くなる透過率 50%の物が使われていた。しかし透過率 50%の物は提示映像の輝度は高くなるものの、周囲の環境の明るさも 50%になってしまうという欠点がある。屋外のように周囲が十分な明るさの場所ならば問題は無いが、室内では周囲の暗さが目立ち、VR 世界の現実世界への自然な重畳が成り立たない場合がある。そのため、環境に合った適切な透過率のハーフミラーを用いることが必要である。

そこで、VR 世界と現実世界の明るさが十分に得られる最適なハーフミラーを選択するため、いくつかの透過率の異なるハーフミラーの比較を行った。図 12 にその結果を示す。A は透過率の低いアクリル製ハーフミラー、B は透過率 60%のガラス製ハーフミラー、C は透過率 70%のガラス製ハーフミラー、D は透過率の高い透明アクリル板を用いた場合である。D の透明アクリル板を用いた場合が最も周囲が明るく、かつ提示映像の輝度も十分に得られているこ

とがわかる。この結果から、X'tal Scope では室内で十分な輝度を得られ、かつ周囲の環境の光量も阻害しないように透明アクリル板を使用することとした。

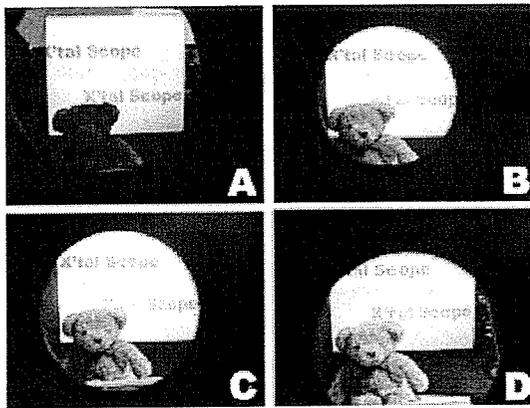


図 1 2 ハーフミラーによる輝度の比較

#### D-2 X'tal Visor 光学系改良の評価

C-2 節の検討を総合的に判断した結果、組み合わせレンズによる光学系の短焦点化という手法を最適なものとして提案する。(なお、以上の手法の他に(A)レンズ-ミラー間の延長、(B)複数球面ミラーの利用、(C)グリーンレンズおよび複数球面ミラーの利用、などの手法も検討したが本稿では省略する)この手法の利点は以下のとおりである。(1)投影光学系の短焦点化により投影視野角が改善される。(2)2枚目のレンズの小型化により実視野角が改善される。(3)構成に必要な光学素子(特にレンズ)が入手しやすく、比較的安価である。(4)配置に厳密な精度を比較的不要としなため、設計・製作が容易。

前述のシミュレーションを基にその有効性の検証のため実装を行った。実装には光学実験台上で既存のレンズホルダを用いた。本手法適用前の投影像と適用後の投影像は

図 1 3 のようになった。これから、投影視野角が広がっていることがわかる。実測した投影視野角は  $38.1[\text{deg}] \times 21.8[\text{deg}]$ 、実視野角は、 $\theta_r = 4.40[\text{deg}]$  となり、理論に近い値となった



図 1 3 複数のレンズを用いた光学系の短焦点化

#### E. 結論

本年度は「患者・医療情報統合システム」として、昨年度試作したインフォムド・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ディスプレイシステムのテストベッドの改良を行った。また、投影光学系の改良設計を行い、最終システム構築の準備を整えた。

現実世界に VR 世界を重畳する立体視可能な 5 自由度両眼 RPT ディスプレイ X'tal Scope の実機の試作を行った結果、任意視点に応じた自然な立体視ができることが確認された。

また、RPT 光学系の実視野角改善のための手法について検討を行い、総合的に 2 枚のレンズを組み合わせることによって光学系の焦点距離を短くし、投影視野角を広げること成功した。

最終的に目標とするシステム実装に向けて、現時点で X'tal Scope システムは実世界とキャリブレーションが十分ではなくこれは来年度に向けた研究課題であるが、問題点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。

490-493, Sep, 2006

#### G. 研究発表

- 論文発表  
現在準備中
- 学会発表  
吉田, 山崎, 梶本, 川上, 館, ”5 自由度  
両眼 RPT ディスプレイの研究”, 第 1  
1 回バーチャルリアリティ学会予稿集,

#### 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

九大病院先端医工学診療部では、東京大学工学部と共同で、マスタースレーブ型手術ロボットを用いた遠隔手術実験を行っている。本研究では国際間ロボット手術として、インターネット回線を用いた動物実験を行い、伝送遅延、映像品質が手術に及ぼす影響を検討した。現時点では距離に関係なくインターネット回線を用いた遠隔手術が可能であった。また、手術に大きく影響する映像品質が、codec など圧縮技術の向上により今後改善する可能性がある。

A. 研究目的

我々は、医療の地域間格差是正や高度先端医療の普及や教育目的としての遠隔手術の有効性に着目し、ロボットを用いた遠隔手術実験にも着手している。本研究では、遠隔手術実現のため、低侵襲手術支援システム[1]を用い、これまで4回にわたり東京-静岡(直線距離約150km)を結ぶブタを対象とした腹腔鏡下胆嚢摘出術手術実験を行った。遠隔手術を行う際、通信手段として専用線を用いることにより安定した通信品質を得ることが可能である。しかし将来的に遠隔手術が広範に適用されるためには、専用回線を用いるより高度に普及が進んでいるインターネット回線を用いることが望ましい。そこで本研究では、インターネットを用いた遠隔手術実現における知見を得るため、国際間(日本-韓国、日本-タイ間)において学術研究用インターネットを用いた遠隔手術実験を行った。

B. 研究方法

低侵襲手術支援システムは、東京大学工学部で開発され、2つのサイト(場所)により構成される。オペレーション・サイトは、執刀医が存在し、操作を行う場所であり、また、サージェリー・サイトは、患者が存在し、実際の手術が行われる場所である。これらの2つのサイトはLAN や ISDN 等様々な回線種別

により接続可能であり、ロボット制御信号、映像、音声等が伝送され声はサージェリ・サイトへ伝送され、サージェリ・サイトの助手への指示等に使用される。スレーブ・マニピュレータは、内視鏡用アーム1腕、手術ツール用アーム2腕の計3腕から構成され、各アームは曲率ガイドを用いた機構的不動点を中心とする回転2自由度、長軸方向の並進1自由度を持つ(Fig. 1)。手術ツールとして、電気メス等の既存製品、リンク駆動式多自由度屈曲鉗子等が取り付け可能である。今年度は日本(九州大学)-タイ(チュロンコン大学)間:直線距離約3700kmでブタを用いた腹腔鏡下手術を行い、ロボットの動作遅れ、映像品質、遅延が手術に及ぼす影響を評価した。

\_(倫理面への配慮)

本研究は動物実験であり、個人情報はいない。動物愛護の観点から、動物実験施設の基準どおりの厳重な管理を行った。



Fig. 1 The minimally invasive surgical system

### C. 研究結果

ロボットを用いた腹腔鏡下胆嚢摘出術が手術時間 90 分で施行可能であった。

ロボット動作指令伝送は UDP/IP プロトコルを用いて、ping による時間遅れ測定結果は、往復 127.4msec であった。

映像品質は今回は MPEG2 による CODEC を用いたため、過去の日本-韓国間での非圧縮映像と比較すると動きの多い画面では映像劣化が見られたが、伝送に必要な帯域は大幅に減少した (Fig2)。

映像伝送時間遅れは、ストップウォッチ映像をループバックして測定し、740msec であった。codec を変更すると短縮効果が見られた。過去の東京-静岡間、福岡-韓国間に比べると伝送距離が大幅に増加したにもかかわらず、ほぼ同等の遅延時間であった。

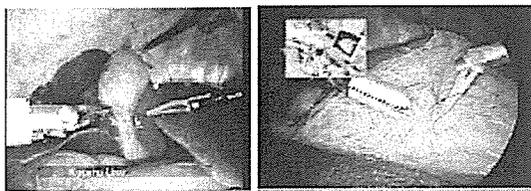


Fig. 2 Comparison of image quality  
(left: Japan-Thailand (Normal), Right: Japan-Korea)

### D. 考察

外科医が体感する時間遅れは、ロボット間の伝送時間遅れ、応答速度、映像伝送遅れの総和によって得られ、本実験では 582.4msec であった。これらは過去の実験と比較して大きな差を認めなかった。今回 3700km 離れた日本-タイ間のインターネットを介した遠隔ロボット手術に成功し、汎用回線をもちいた遠隔手術は既に実用段階にあると考えられた。伝送時間遅れに関しては、映像の遅延が手術ロボットの操作性に及ぼす影響が大きく、これらは回線の品質よりも codec 性能の向上により改善する可能性が示唆された。

### E. 結論

ネットワークを介した遠隔ロボット手術は既に実用段階にある。マスタースレーブ間の動作指令の遅延よりも映像品質が手術に及ぼす影響が大きかった。

### F. 健康危険情報

なし

### G. 研究発表

#### 1. 論文発表

Hashizume M: MR image-guided surgical robotic system. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery 1(1): 203-205, 2006

小西晃造、中本将彦、佐藤嘉伸、田村進一、橋爪 誠: 光磁気ハイブリッド三次元位置センサによる内視鏡外科手術 AR ナビゲーションシステム ~in vivo 精度検証~. 日本コンピュータ外科学会誌 8(2): 81-87, 2006

荒田純平、高橋弘樹、Phongsan Pitakwatchara、割澤伸一、田上和夫、小西晃造、家入里志、清水周治、中島直樹、岡村耕二、藤野雄一、上田幸宏、Pornarong Chotiwan、光石 衛、橋爪 誠: 低侵襲手術支援システムによる日本-タイ遠隔手術実験. 第15回日本コンピュータ外科学会大会/第16回日本コンピュータ支援画像診断学会大会合同論文集 33-34, 2006

#### 2. 学会発表

Hashizume M: Image-guided surgical robotic system. Computer Assisted Radiology and Surgery 20th International Congress and Exhibition. June 28-July 1, 2006, Osaka, Japan

Hashizume M: Augmented reality. 24th World Congress of Endourlogy. August 17-20, 2006, Cleveland, USA

Hashizume M: Image-guided robotic surgery. The Congress of Endoscopic & Laparoscopic Surgeons of Asia 2006. October 18-21, 2006, Seoul, Korea

橋爪 誠: コンピュータ外科と精密誘導手術. 第19回日本内視鏡外科学会総会. 2006年12月5-7日, 東京

### H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得 なし

2. 実用新案登録 なし

3. その他 なし

## 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。本報告ではこれまで試作した実験用の磁場発生装置と磁場駆動型マニピュレータシステムを用いてマニピュレータ先端の位置制御方法の検討を行い、応答性を検証した。

### 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。そこで、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。

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、マニピュレータの原理の構築および試作を行った。今年度は、マニピュレータの位置制御系の構築について報告する。

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おり、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。

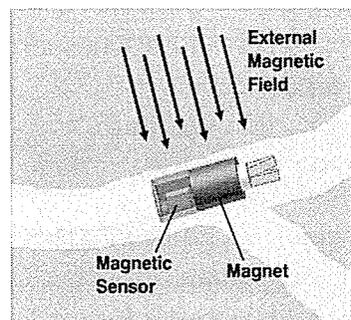


Fig.1 Manipulator Scheme

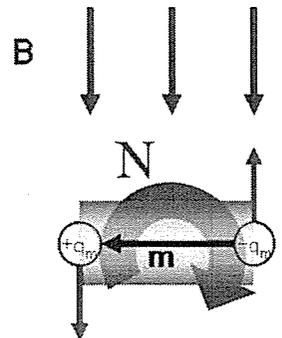


Fig.2 Generated Moment

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

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。

また、外部磁場装置を基準座標系とした場合のマニピュレータの先端の角度は外部磁場の角度と磁気センサから検出した角度の和となってセンシングが可能である。

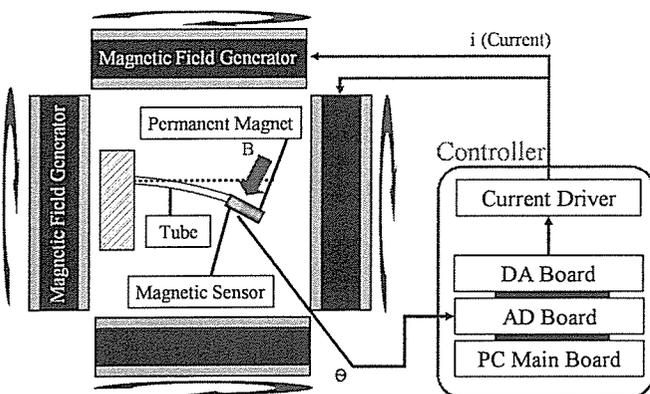


Fig.3 System Component

## 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試作した、外部磁場発生装置を Fig.4 に示す。臨床を想定するより小さい実験用の 2 軸とし、中央部において均一磁場を発生させることが可能である。これを用いて平面座標での動作の構築を目指した。

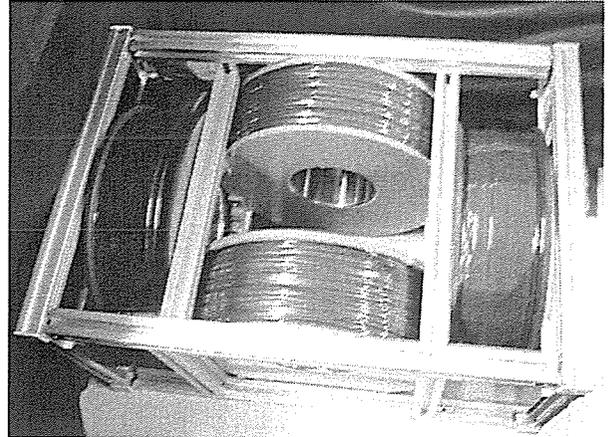


Fig.4 Prototype of 2 axis magnetic field generator

## 磁気駆動型マニピュレータ

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 つから構成される (Fig.5 左図)。先端部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。センサはホール素子を用いることによって、ホールセンサにかかる外部磁場の傾斜角度を検出することが可能である。これより、操作量は外部磁場の傾斜角度であることから、ホール素子の検出する姿勢から、外部磁場発生装置の座標系(絶対座標系とする)における先端部の姿勢を求めることが可能である。また、チューブは体内に入るのに十分に柔らかい材質のものを選定し、動力伝達とホール素子の配線を可能とした。

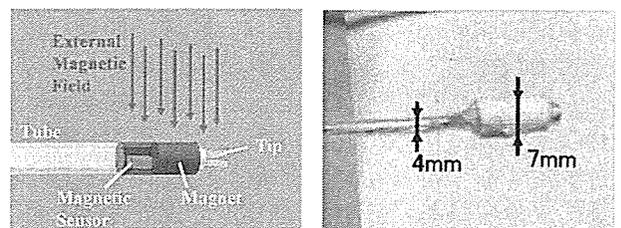


Fig.5 Magnetic driven manipulator

## B.3 制御方法

永久磁石に発生するモーメントは、外部磁場の方向と永久磁石の磁化された方向とのなす角度  $\theta$  に依存し、角度が  $90[\text{deg}]$  に近いほど曲げモーメントは大きくなり、 $0[\text{deg}]$  に近いほど小さくなる。このため

曲げモーメントで先端の姿勢が変わり永久磁石の磁化の方向が外部磁場と平行に近づく、発生する曲げモーメントは小さくなる。したがって一定の方向から外部磁場をかけるだけでは外部磁場発生装置に必要な起磁力が非常に大きくなる。そこで磁気センサの情報より外部磁場の方向を常に磁石の磁化方向と 90[deg]に近くなるよう動的に変化させる必要がある。仮に 90[deg]曲げるためには、チューブの弾性を考慮すると、磁場の方向を変えない場合、Fig.6 の Uncontrolled に示すようになる。また、常に外部磁場の方向と磁石の磁化方向を 90[deg]になるように制御した場合について、チューブ必要となる外部磁場は、Controlled に示す。

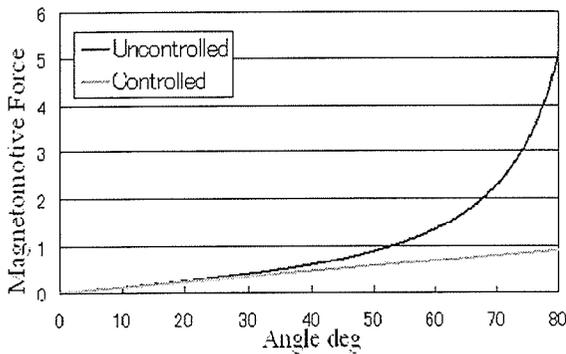


Fig.6 Relationship between magnetic force value and bending angle of the manipulator in controlled or not controlled magnetic direction

これにより外部磁場の強さだけでなく、永久磁石との相対角度の制御を行なうことで、必要な外部磁場の起磁力を大幅に減少していることを示すことが出来、効率があげることが可能である。このように磁場の方向を決定し、目標マニピュレータ角度と現在角度との偏差から外部磁場の強さを決定することで、マニピュレータの姿勢制御を行なう。

### 制御アルゴリズム

制御は磁場とマニピュレータ先端の永久磁石の相対角度を常に 90[deg]に保ちながら、磁場の磁束密度の大きさを操作することで曲げ角度の決定を行っている。したがって磁場とマニピュレータ先端磁石の間の角度を 90[deg]に保つための制御と、磁場の磁束密度を決定するマニピュレータの角度制御の 2つの制御系に大分される。Fig.7 にパラメータを示す。この制御の概略のブロック線図を Fig.8 に示す。Fig.8 において破線より左がコントローラ内、右側が実機の動作を示している。このうちの外部磁場の方向  $\phi$  と磁束密度の絶対値  $B$  を操作することでマニピュレータ角度  $\psi$  の制御を行った。

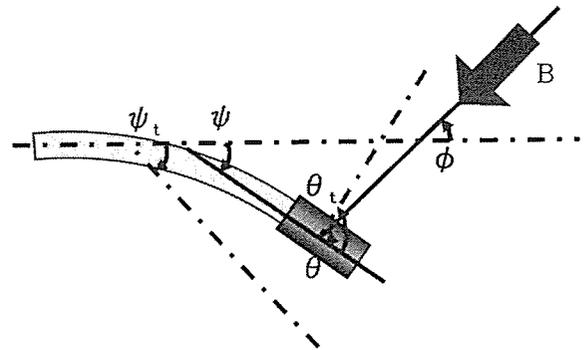


Fig.7 Parameter

- $\psi$  : マニピュレータの曲げ角度
- $\psi_t$  :  $\psi$  の目標値
- $\phi$  : 外部磁場の方向
- $\theta$  : マニピュレータと外部磁場のなす角度
- $\theta_t$  :  $\theta$  の目標値 ( $\theta_t=90$  で一定)
- $B$  : 外部磁場の磁束密度の絶対値

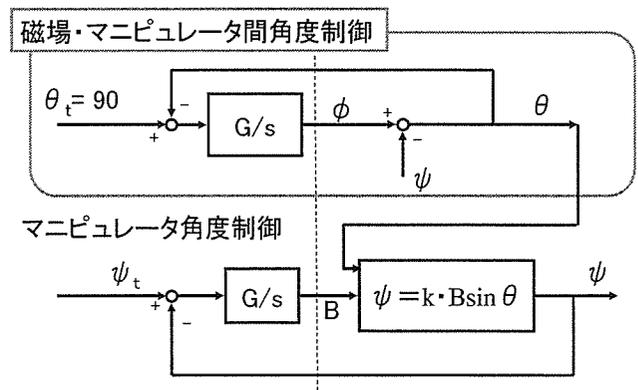


Fig.8 Control Algorithm

(倫理面への配慮)

当研究はマニピュレータの駆動制御の構築が目的であるため、生体等を用いていない。よって研究に関係するものの倫理面、危険性は特になく、倫理面への配慮は特に必要ない。

## C. 研究結果

### C.1 磁場・マニピュレータ間角度制御

Fig.8 における磁場・マニピュレータ先端間の角度を 90[deg]に保つための制御について、検証を行った。磁場の強さを一定として、センサにマニュアルで動かし、相対角度が追従する際の応答の様子を Fig.9 に示す。

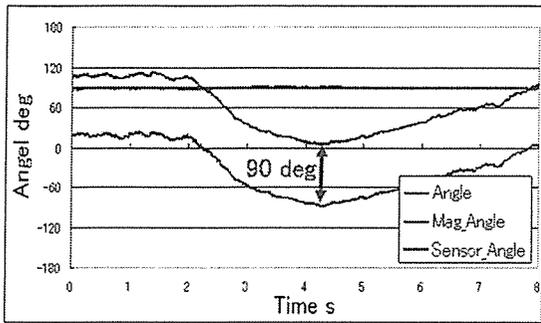
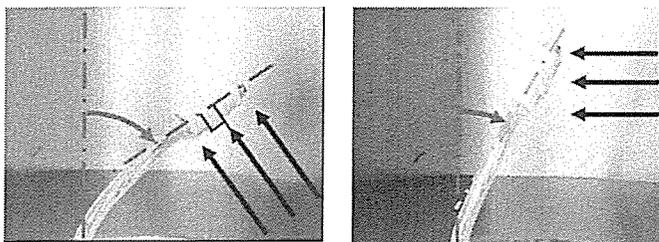


Fig.9 Control of Angle between Magnetic Field and Manipulator

制御を行った場合、マニピュレータの現在の角度を回転させると磁場の方向がマニピュレータの角度に追従して変化し、磁場・マニピュレータ間角度を示しているセンサの角度は90[deg]で一定値を取ることが確認された。

### C.2 相対角度の有効性検証

磁場・マニピュレータ先端間の角度を90[deg]に制御した場合、制御を行わず1方向のみから磁場を加えた場合よりも、実際にマニピュレータの曲げ角度を大きくすることが可能かを確認するために検証を行った。各軸の磁場の強さの最大値を一定として、磁場・マニピュレータ先端間の角度を90[deg]に保つための制御を行った際の曲げ動作の様子を Fig.10(a)に、制御を行わず一方向のみから磁場を加え続けた際の曲げ動作の様子を Fig.10(b)に示す。これより磁場・マニピュレータ先端間の角度の制御を加えた場合はマニピュレータ先端角度が56[deg]曲がり、一方向のみから磁場を加え続けた場合は30[deg]曲がった。以上より磁場・マニピュレータ先端間の角度を90[deg]に保つ制御を行うことで、同じ強さの磁場をかけた場合でもマニピュレータの曲げ角度を大幅に大きくすることができ、この制御が有効であると考えられる。



(a) Controlled Bending (b) Uncontrolled Bending  
Fig.10 Bending Motion

### マニピュレータ角度制御

#### C.3 応答性検証

磁場・マニピュレータ先端間の角度を90[deg]に保つ制御に加えて、マニピュレータの目標角度と現在角度との偏差より磁場の強さを決定してマニピュレ

ータ角度を決定する制御 (Fig.8) を行った。そのときのマニピュレータの応答性を Fig.11 に示す。Fig.11 は目標値を45[deg]となるようステップ状に目標角度を変化させたときのマニピュレータ角度の応答性を示したものである。なお、このときの角度  $\psi$  は磁場の方向  $\phi$  および磁場・マニピュレータ間の角度  $\theta$  より算出したもの (外部磁場発生装置の座標系で、初期位置を0[deg]とした場合) であり、磁場の方向の乱れによる誤差は含まれていない。これより10秒程度で収束していることが確認される。これは磁気駆動方式の原理的な遅れではなく、マニピュレータの動作の安定性を重視して制御のゲインを小さくしたためである。しかし、遅れはややあるものの手術中のマニピュレータ誘導動作には高速な追従性は要求されないため、十分な応答時間であると考えられる。

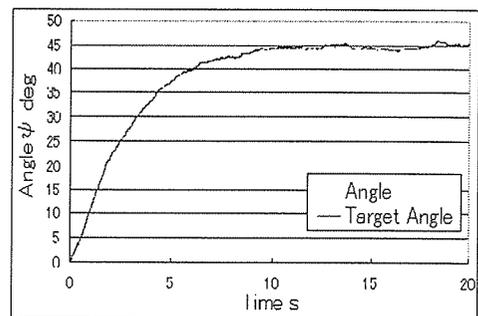


Fig.11 Manipulator Response

#### C.4 精度検証

目標値をステップ状に与え、十分収束した後のマニピュレータ先端の目標角度と測定した角度の関係をプロットしたものを Fig.12 に示す。これは外界から画像により測定した値となっており、すべての誤差を含んだ値となっている。

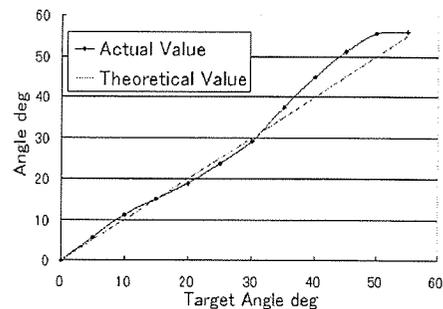


Fig.12 Manipulator Accuracy

これより誤差は最大で6[deg]となった。その中でも特に35~55[deg]では誤差が大きくなっている。これは、マニピュレータは磁場の方向の誤差が±5[deg]に収まる部分内で動作検証を行なったが、外部磁場発生装置のシミュレーション結果をみると、特に45[deg]方向では磁場の一様性の乱れが大きいことが確認される。したがって、一様な方向と大きさの磁場がかかっているものとして処理を行っているが、実際はやはずれた方向に磁場が発生している場所が

あり、これを制御上、誤差 0[deg]として入力していることに磁場が発生していることに原因であると考えられる。しかしこの磁場の乱れによる誤差は同じ場所では一定であるため、術者が画像を見ながら、偏差の角度だけ磁場の方向や大きさを調整することで修正できるものであると考えられる。以上より、管内では誤差±5[deg]程度の大まかな方向を決定することが出来れば、管壁に沿わせてマニピュレータの進路を決定することが出来るため、進路の決定には十分な精度が出ていると考えられる。したがって、この制御方を用いたシステムは管内部誘導に用いることができる。

#### D.考察

構築した磁気駆動マニピュレータシステムにより、体内に柔軟にアプローチが可能であると考えられる。しかし、本報告における検討は、理想的な状態においてである。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、その姿勢制御の構想を示した。今後は試作したシステムを用いて、マニピュレータの評価を行う予定である。

#### G.研究発表

##### 1.論文発表

なし

##### 2.学会発表

1. 元吉正樹, 岡安はる奈, 岡本淳, 藤江正克, “低侵襲手術用磁気駆動方式マニピュレータの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006 論文集, 2A1-A11, 2006-5

#### 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

高透磁率磁性体へ高周波電流やパルス波を直接通電する際に、外部磁界を印加することで、その透磁率変化を介して、表皮効果または自然共鳴など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、MIセンサあるいは高周波キャリア型磁界センサと呼ばれ、高感度化の研究及び産業応用が議論されている<sup>1)2)</sup>。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<sup>3)</sup>。この磁界センサの高感度化においては、磁性薄膜の一軸磁気異方性を制御することが重要となる。

これまでに、磁界中熱処理によってアモルファスCoNbZr薄膜に誘導磁気異方性を付与した高周波キャリア型磁界センサが報告されている<sup>4)</sup>。このセンサ素子は熱処理温度により磁性薄膜の異方性強度を制御し高感度化を図ったものであった。一方、磁性薄膜の異方性分散を低減させると、インピーダンス変化が急峻になり更なる高感度化が望めると考えられる。しかし磁界中熱処理による異方性制御のみでは、磁性薄膜の異方性強度と異方性分散を共に制御することは困難であった。

本研究は磁界中熱処理に代わる新たな異方性制御を試みることにより高周波キャリア型磁界センサの更なる高感度化を目指すものである。本報告では新たな異方性制御として形状磁気異方性に注目し、磁性薄膜の形状による異方性制御を試みた結果について述べる。具体的には、形状磁気異方性を利用したセンサを提案し、磁性薄膜の反磁界強度を求めることによりセンサ素子を設計した。次に設計し

たセンサを実際に作製し、磁性薄膜の形状によりセンサ素子の異方性強度を制御出来ることを示した。さらに、隣接する磁性膜の間隔による異方性制御を試み、隣り合う磁性膜間の静磁気結合を利用し異方性強度を緩和出来ることを示した。これらの検討により提案した形状磁気異方性を利用したセンサが高周波キャリア型磁界センサとして実現可能であることを示した。

#### (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。

### B. 形状磁気異方性を利用した磁気センサ

#### a) センサ構造

Fig. 1に従来のセンサ素子と本研究で提案するセンサ素子の概念図を示す。従来のセンサ素子は磁性薄膜に磁界中熱処理を施すことにより、磁化容易軸を素子幅方向とした誘導磁気異方性を付与していた。これに対して提案するセンサ素子は磁性薄膜を短冊状に加工することにより、磁化容易軸を従来のセンサ素子と同様に素子幅方向とした形状磁気異方性を付与した。これにより磁性膜は通電方向に対して分断されるため、導電体を形成しここにキャリア電流を通電する構造とした。

このようなセンサ構造にすることにより磁性薄膜の寸法比によりセンサ素子の異方性強度の制御が可能となる。また、素子の異方性は磁性薄膜の形状でのみ決まるので、磁性薄膜の形状を精度よく加工することにより異方性分散の低減化も期待される。

## b) 素子設計

本センサ素子はある外部磁界を印加した時にインピーダンスが最大となることが予想される。これは、外部磁界に

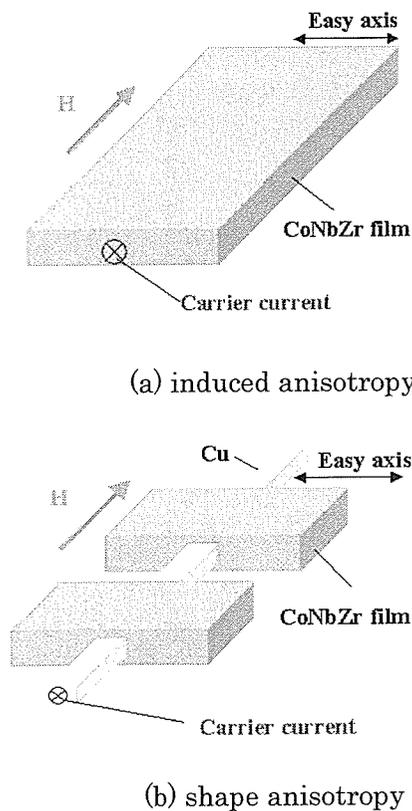


Fig. 1 Conceptual diagram of sensor elements.

よって磁性薄膜の磁化が回転し、磁化が全て困難軸方向を向いた際に通電電流に直交方向の透磁率が最大となるためである。インピーダンスが最大値となる外部磁界を小さくすることによりインピーダンスはより急峻に変化するため、センサの高感度化においては磁性薄膜の磁化が困難軸方向に飽和する際の磁界強度を小さくする必要がある。本センサ素子では磁性薄膜の磁気特性が等方性であると仮定すると、磁化が困難軸方向に飽和する時の磁界強度と磁性膜幅方向の反磁界強度は等しくなる。

そこで磁性膜幅方向の反磁界強度を指針として素子設計を行った。(1)式に磁性膜幅方向の反磁界強度  $H_a$  の計算式を示す。

$$H_a = N \frac{M_s}{\mu_0} \quad (1)$$

$M_s$  は磁性薄膜の飽和磁化量を表しており、本研究では磁性体としてアモルファス CoNbZr を用いたので 1 T とした。また、 $N$  は反磁界係数を表しており、回転楕円体近似によって計算することが出来る<sup>5)</sup>。磁性膜幅方向の反磁界係数を求める計算式を式(2)および式(3)に示す。

$a \leq b \ll c$  の時

$$N = \frac{c}{a} \frac{E - (1 - e^2)K}{e^2(1 - e^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

$$e = (1 - \frac{b^2}{a^2})^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここで  $a$  は磁性薄膜の長さ、 $b$  は幅、 $c$  は膜厚を表しており、 $K$  は  $e$  を指数とした第 1 種完全楕円積分、同様に  $E$  は第 2 種完全楕円積分である。

式(1)~式(3)を用いて従来のセンサの異方性磁界強度と同じ値である 6 Oe を指標として、反磁界強度が 6 Oe となる磁性薄膜の短冊の寸法を計算した。従来のセンサと同程度のセンササイズにするには磁性薄膜の長さを 100  $\mu\text{m}$  以下にする必要があるが、この場合磁性薄膜の膜厚を数 10 nm にする必要がある。しかし、膜厚を非常に薄くすると磁気特性が劣化してしまう恐れがあるため、本研究では磁性薄膜の膜厚を最低 0.5  $\mu\text{m}$  と設定した。また、磁性膜の幅と長さに関しては反磁界を考慮すると出来るだけ大きい事が望ましいが、今回は現実的なサイズとして磁性膜の長さを 1 mm、幅を数 100  $\mu\text{m}$  とした。

## C. センサ素子の構造と作製

Fig. 2 に作製したセンサの模式図を示す。本研究では磁性体として  $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$  を使い、高周波キャリアを通電する導電体として Cu を用いた。前述のように磁性膜のサイズが決定されたことからセンササイズはこれまでの検討に比べて大きくなり、Cu の寸法は長さ 15 mm、幅 100  $\mu\text{m}$ 、膜厚 0.5  $\mu\text{m}$  となった。CoNbZr の寸法は長さ 1 mm、膜厚 0.5  $\mu\text{m}$  とし幅  $w$  と隣接する磁性膜の間隔  $d$  を可変とした。幅  $w$  を可変とすることにより磁性膜の形状を制御し、形状異方性を利用してセンサの特性制御について検討した。一方磁性膜の間隔  $d$  を可変とすることにより隣り合う磁性薄膜同士の静磁結合を制御し、それによる異方性制御について検討した。

Fig. 3 にセンサの作製工程を示す。作製手順は以下の通りである。

1. レジストを 1 インチのガラス基板上に厚さ約  $2 \mu\text{m}$  塗布しフォトリソグラフィ技術によりレジストパターンニングを行う。
  2. RF スパッタ法により CoNbZr 薄膜を成膜する。CoNbZr 薄膜の成膜条件は 投入電力 200 W, Ar ガス圧 20 mTorr とした。
  3. 有機溶剤によりレジストおよびレジスト上に成膜された磁性膜を同時に剥離し(リフトオフ), パターンニングを行う。
- 1 ~ 3 の手順を繰り返し Cu 薄膜についても行いセンサを作製した。

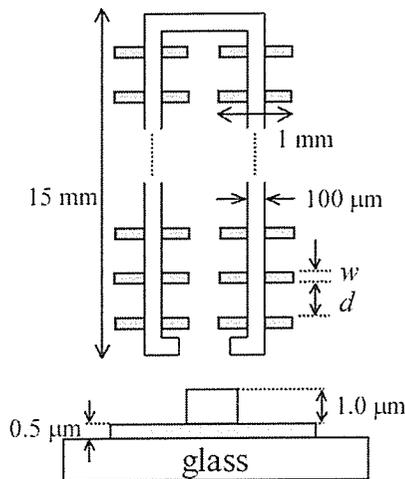


Fig. 2 Schematic view of sensor element.

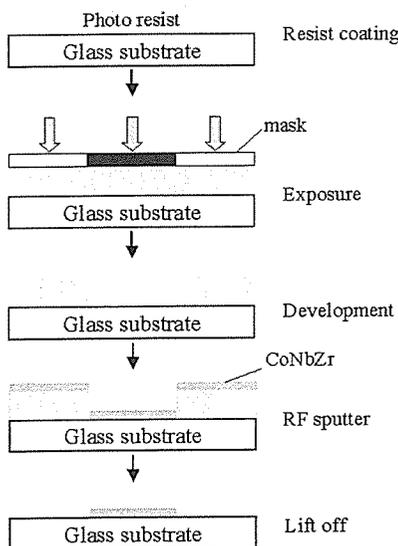


Fig. 3 Process chart.

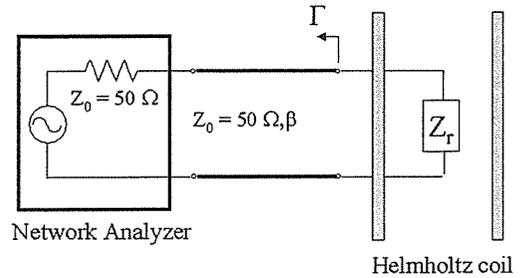


Fig. 4 Impedance measurement system.

### C. 実験結果

センサ素子の外部直流磁界 - インピーダンスの関係を実験的に測定した。Fig. 4 はセンサ素子のインピーダンス測定系を示したものである。インピーダンスはネットワークアナライザを用いて反射法  $\Gamma$  により測定した。外部直流磁界はヘルムホルツコイルによりセンサ素子の磁化困難軸方向に印加した。ネットワークアナライザからセンサ素子への入力電力は 0 dBm で一定とし、磁化容易軸方向に微小振幅の交流励磁が行われるように高周波キャリアを通电した。

#### a) 磁性膜幅の影響

まず、磁性膜の形状によるセンサの異方性制御を試みた。本研究では磁性膜の幅  $w$  を可変パラメータとすることにより磁性膜の形状を制御した。磁性膜の幅  $w$  を  $100 \mu\text{m}$ ,  $200 \mu\text{m}$ ,  $400 \mu\text{m}$  とした際の直流磁界  $H$  とセンサ素子のインピーダンスの関係を実験的に測定した結果を Fig. 5 に示した。またセンサ素子の困難軸方向の磁化曲線を Fig. 6 に示した。ここで隣り合う磁性膜が互いに影響を及ぼさないようにするために磁性膜間の距離  $d$  は  $4w$  に等しくなるように設定した。

Fig. 5 から形状磁気異方性を利用したセンサで磁気-インピーダンス効果が生じることは明らかである。また、インピーダンスが極大となる外部磁界強度が磁性膜の幅によって変化していることを確認した。さらに、Fig. 6 から磁性膜の幅によって磁化が飽和するのに必要な磁界強度が変化していることを確認した。これらの実験結果によりセンサ特性を磁性膜の形状により制御可能であることを示した。

Table 1 にインピーダンスが極大となる外部磁界強度と磁性薄膜幅方向の反磁界強度の計算値を示す。Table 1 からインピーダンスが極大となる外部磁界強度と幅方向の反磁界強度は概ね一致していることが分かる。さらに Fig. 6 から磁化が飽和するのに必要な磁界強度も反磁界強度と概ね一致して

いることが分かる. 理論的にはインピーダンスピーク時の外部磁界強度とセンサ素子の異方性強度, さらに磁化が飽和するのに必要な磁界強度は等しくなるため, これらの結果より反磁界強度の計算値の妥当性を示すと共に実験結果の妥当性を示すことが出来た.

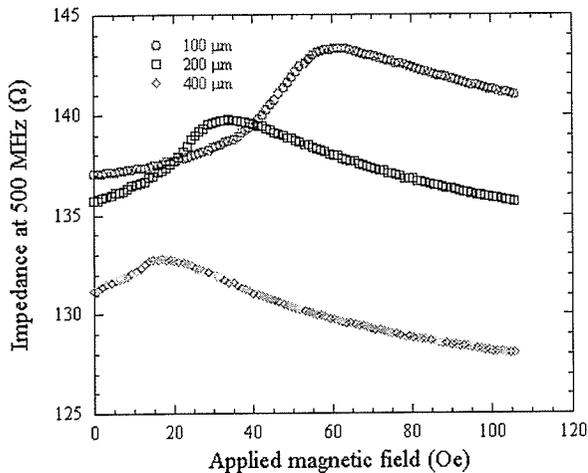


Fig.5 Impedance-measured results

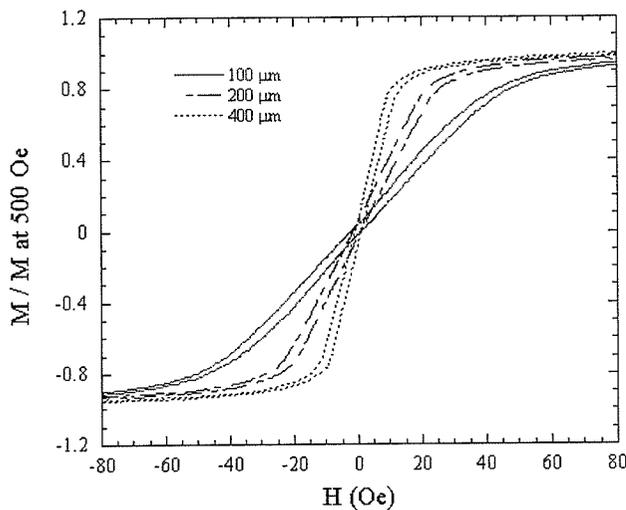


Fig.6 M-H loops

Table 1 Relationship between  $H_{dc}$  at Impedance maximum and demagnetizing field.

Width of the magnetic film (mm)	$H_{dc}$ at Impedance maximum (Oe)	Demagnetizing field (Oe)
100	57	49
200	33	29
400	18	11

b) 磁性膜間隔の影響

磁性膜間の距離を変化させることによるセンサ

の異方性制御を試みた. 磁性膜の幅を  $200 \mu\text{m}$  と固定して磁性膜間の距離  $d$  を  $800 \mu\text{m}$ ,  $200 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$ ,  $20 \mu\text{m}$  と変化させた. センサの直流磁界  $H$  に対するインピーダンスの測定結果を Fig. 7 に示し, センサ素子の困難軸方向の磁化曲線を Fig. 8 に示した. さらに Fig. 7 から読み取ったインピーダンスが極大となる外部磁界強度  $H_{max}$  と磁性膜間の距離の関係を Fig. 9 に示した.

Fig. 7, Fig. 9 から磁性膜間の距離を縮めることによりインピーダンス最大時の外部磁界強度  $H_{max}$  が小さくなっていることが分かる. また, Fig. 8 から磁性膜間の距離を縮めることにより磁化が飽和するのに必要な磁界強度が小さくなっていることが分かる. これは隣り合う磁性膜間の静磁結合によってセンサの異方性強度が小さくなったためと考えられる. これらの結果から磁性膜間の距離を変化させることによりセンサの異方性制御可能であることを示した.

参考として磁性膜間の距離を 0 にしたものとして大きな一つの磁性膜で構成したセンサの磁化曲線も Fig. 8 に示した. この結果より, さらに磁性膜間の距離を縮めることにより更に磁性薄膜の異方性強度を小さくすることが望めると考えられる.

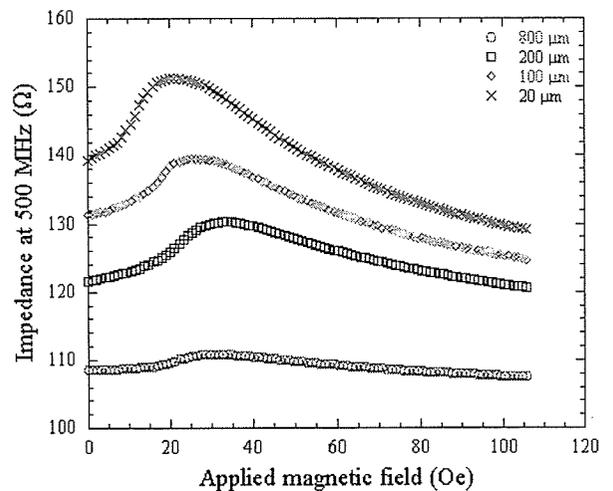


Fig.7 Impedance-measured results

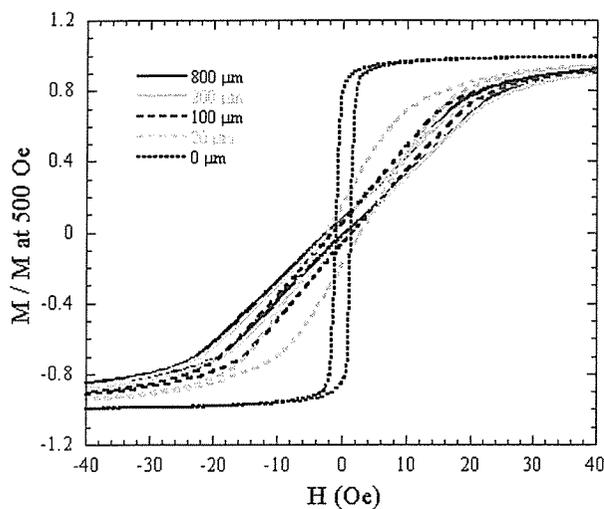


Fig.8 M-H loops

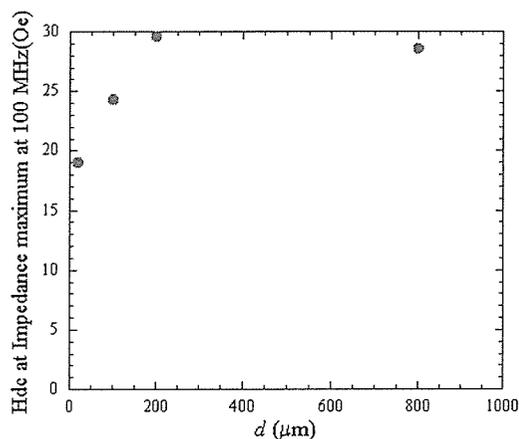


Fig.9 Relationship between  $H_{dc}$  at Impedance maximum and  $d$

## D. 結論

反磁界強度を求めることによりセンサ素子設計の指針とし、指針に基づきセンサ素子を製作し磁気インピーダンス効果が生じることを確認した。また、磁性薄膜の形状によって異方性強度を制御し、センサ特性を可能なことを示した。さらに、磁性膜間の距離による異方性制御が可能であることを示し、磁性膜間の距離を縮めることによりセンサの異方性強度が小さくなることを確認した。また磁性膜間の距離をさらに縮めることにより異方性強度を小さく出来る可能性を示した。これらの検討により形状磁気異方性を利用したセンサが高周波キャリア型磁界センサとして実現可能であることを示した。

## 参考文献

- 1) A. Takayama, T. Umehara, A. Yuguchi, H. Kato, K. Mohri, T. Uchiyama : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **24**, 763 (2000).
- 2) S. Yabukami, T. Suzuki, N. Ajiro, H. Kikuchi, M. Yamaguchi, and K. I. Arai : *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 2019 (2001).
- 3) M. Takezawa : Doctoral dissertation of Tohoku University, p. 216 (1999).
- 4) H. Mawatari, H. Kikuchi, S. Yabukami, M. Yamaguchi, and K. I. Arai : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, 414 (2003).
- 5) J. A. Osborn : *Physical Review*, **67**, 351(1945).
- 6) K. I. Arai, M. Yamaguchi, and H. Ohzeki : *IEEE Trans. Magn.*, **28**, 2175(1992).
- 7) M. Masuda, S. Shiomi and M. Shiraki : *J. Appl. Jpn.*, **26**, 1680(1987).

## E. 研究発表

### 論文発表

1. 仙道雅彦、中居倫夫、橋奈緒子、星則光、鈴木秀夫、堀越直、藪上信、石山和志、荒井賢一、「端部磁性体を配置した高周波キャリア型磁界センサの感度向上に関する研究」、日本応用磁気学会、vol.28, pp.225-228, (2006).
2. 村山芳隆、小澤哲也、堀越直、藪上信、石山和志、荒井賢一、「熱処理温度制御による高周波キャリア型薄膜磁界センサの高感度化」、日本応用磁気学会、vol.28, pp.237-242, (2006).
3. 豊田征治、栢修一郎、藪上信、大矢雅志、石山和志、岡崎靖雄、荒井賢一、「複数 LC 共振型磁気マーカを用いた多点位置検出システム」、日本応用磁気学会、vol.28, pp.391-395, (2006).
4. S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, K. Ishiyama, Y. Okazaki, K. I. Arai, "Wireless Magnetic Motion Capture System for Multi-Marker Detection," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.42, No.10, pp.3279-3281, (2006).

## F. 知的所有権の取得状況

なし