

平成 21 年 6 月 8 日現在

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2006～2008

課題番号：18680042

研究課題名 (和文) オープン MRI 下高精度治療のための画像表示および  
治療ロボティクスシステム研究課題名 (英文) Image Visualization and Robotic System for  
High precision Surgery under Open MRI

研究代表者

正宗 賢 (MASAMUNE KEN)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号 00280933

研究成果の概要：

本研究では、豊富な情報を有するオープン MRI 下において手術情報と手術機械を融合した高精度治療システムを目指す。具体的には、狭所である MRI ガントリの内部で治療するため、高い MRI 対応性を有したリアルタイム画像重畳システムおよび、患部へと精密に誘導するターゲット追従型ロボットの開発指針の確立および基盤技術開発を行った。これにより、従来不可能であった術中画像観察下における直感的かつ定量的な治療作業を可能とした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2007 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2008 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
総計	17,100,000	5,130,000	22,230,000

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, 超音波モータ, 拡張現実感, 非磁性アクチュエータ, MRI, 手術ナビゲーション, 医療用ロボット

## 1. 研究開始当初の背景

MRI (核磁気共鳴断層画像装置) は診断のみならず、治療にも積極的に用いられるようになってきた。特に、患者に対して術者 (執刀医) の手が届く開口型のオープン MRI を手術室内に導入することにより、手術中に患部周辺の断層画像の撮像を行なうことが可能となり、脳外科手術のナビゲーション治療などが積極的に行なわれている。また、MRI の内部にて画像誘導下による肝臓腫瘍穿刺を行う試みも報告されている。しかしながら、MRI 内は狭所であるために術者の十分な作業環境が得られない。また、手術中は撮影された患部の MRI 画像と患者を見比べ、患部の位置を予測しながら手術を行うか、術具の位置・方向をモニタ画面に出しながら作業を進める必要がある。このため、術者の作業を

行う患部の位置は術者の技量、知識、経験に大きく依存しており、正確な位置情報を有効に活用できないのが現状である。すなわち、作業支援を補助するマニピュレータや情報をより直感的に提示するナビゲーションシステム等の工学的な支援を必要としている。MRI 内は撮像原理より、強磁場環境下で電磁波測定を行うため、磁性材料が使用できないことや、機器からの電磁波漏洩による画像への影響など、手術支援システムを開発するに当たり解決すべき問題が多い。

## 2. 研究の目的

本研究ではこれらの問題を解決するための MRI 環境下の基盤要素技術として、以下の研究開発を行うことを目的とする。

(1) リアルタイム画像重畳システムの開発

- (2) 術者誘導追尾型ロボットの開発  
漏洩電磁波対策手法の確立および超音波モータ使用による穿刺ロボット開発  
非磁性非金属アクチュエータの開発および穿刺ロボット開発
- (3) 画像情報・ロボット・術者の座標系統合によるリアルタイム穿刺インタフェースの開発
- (4) 上記開発システムのファントム実験等による評価

### 3. 研究の方法

MRI 内で稼働するシステムの前条件として、MRI 対応性の確保がある。MRI は常時 0.2~数 T の磁場強度下でかつ均一な磁場により画像が得られるため、MRI ガントリ内で動くデバイスを開発する場合は、均一な磁場を乱さない、NMR 信号の受信を妨げないという双方向の影響に考慮する必要がある。特に電子機器を導入する際は漏洩電磁波対策が重要となる。ここでは 0.2T の MRI を用いたシステム開発を行う。

#### (1) リアルタイム画像重畳システムの開発

術中に画像情報の提示手法としてハーフミラーによる画像重畳表示手法を用いた。術者は偏光メガネや HMD などの装着が不要であり、左右の視野画像が固定された両眼立体視による観察ではないため、幾何学的に画像情報の空間位置が定まった位置にて情報を得ることとなる。また複数人が観察でき、治療に適した手法である。本研究では、MRI 対応性に優れる非磁性・非金属の画像表示ディスプレイの開発を行い、MRI 内にて術中に撮像した画像を観察するシステムの開発を行う。

#### (2) 術者誘導追尾型ロボットの開発

MRI 内の穿刺治療において針の位置決めを支援するためのマニピュレータを開発する。アクチュエータとして 超音波モータを用いたもの、完全に MRI 対応した非磁性・非金属のロボットの開発を行う。以下にそれぞれ述べる。

超音波モータを用いた穿刺支援ロボットの開発を行う。モータから漏洩するノイズの計測を行い、MRI の共鳴周波数帯で信号に影響を与えない対策手法の確立およびシールド実装を行う。また、2 自由度の穿刺位置決めするロボット開発を行う。

より高い MRI 対応性を得るため、非磁性非金属のアクチュエータの考案および穿刺ロボットの開発を行う。

#### (3) 画像情報・ロボット・術者の座標系統合インタフェース

上述の(1)(2)で開発したデバイスの MRI 画像および環境における位置関係を把握するための座標系統合アルゴリズム開発を行う。画像歪については完全非磁性・非金属化することによる根本的な解消を目指し、また対象

臓器の移動・変形に対して追従可能なシステム開発を行う。

#### (4) ファントム実験・臨床前実験および評価

各システムに対して MRI 対応性の評価および、臓器を模したファントムなどによる評価実験を行い、有用性を明らかにする。

### 4. 研究成果

ここでは(1)~(3)については各開発したデバイス・システムについて述べ、(4)にてそれらの評価結果を述べる。

#### (1) リアルタイム画像重畳システム

CRT、LCD などの電磁気を利用した画像表示装置を MRI に導入すると電磁波ノイズが実用上大きな問題となる。そこで、図 1 に示す光ファイバ束による画像伝送手法を考案した。プロジェクタから投影された 256x256 pixel の画像を 1.8mm の大きさに縮小し、50000 本のファイバから成るイメージガイドファイバ端面に結像させる。画像はデバイスのズームレンズにより拡大される。デバイス部は全て非金属で作成することが出来、ノイズ発生源であるプロジェクタは MRI 撮影室外に設置することが出来るため、撮像に影響を与えることはない。図 2 に、開発したシステムを MRI 内へ導入した概観を示す。

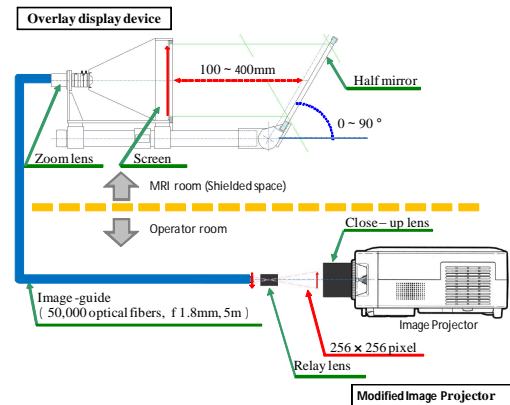


図 1 非磁性非金属ディスプレイの原理図

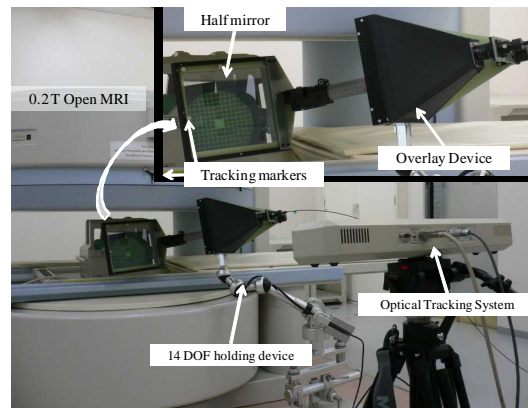


図 2 画像重畳デバイスの MRI 内への導入

これにより MRI 内にて術中に撮像した画像を観察することが可能となり、これまで困難であった MRI ガントリ内での対象へのアプローチを直感的に行うことが可能となる。

### (2) 術者誘導追尾型ロボットの開発

狭所である MRI ガントリ内で針等の刺入点を手動で設置するとターゲットの方向に針の方向を精密位置決めする、2 自由度のロボット開発を行った。2 本のアームの相対位置関係により針の方向が決まる機構であり、アームを分離することで滅菌性にも優れる。

図 3 に示す、超音波モータを用いたロボットを開発した。撮影近傍には樹脂部品を用い、アクチュエータ部は樹脂を用いた。主にアルミ板のシールドによりモータからの漏洩電磁波を抑える。また、0.2TMRI における電磁波対策の指標を計測により明らかにし、シールド実装の最適化を図った。

超音波モータは電磁気回路を用いるため、磁場強度が高い環境下では磁場漏洩を防ぐことも金属による信号減衰の影響も避けられない。そのため、より高い MRI 対応性を得るためには、非磁性非金属のアクチュエー

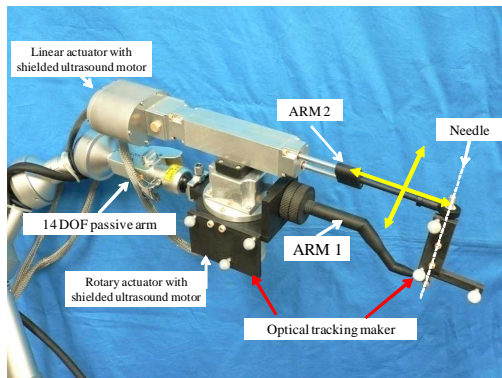


図 3 超音波モータを用いた 2 自由度ロボット

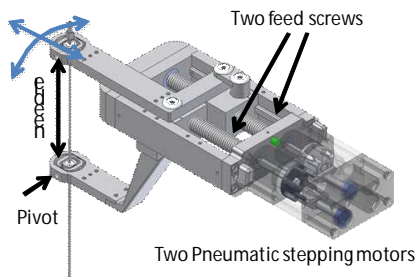


図 4 非金属空圧ステッピングアクチュエータによる 2 自由度ロボット 上) 原理図 下) MRI 内に導入した実験時の概観

タが必要である。ここでは、回転アクチュエータの考案およびそれも用いた穿刺ロボットの開発を行った。空圧で鋸歯を上下運動させ、噛み合わせをずらすことで回転運動させるステッピングモータであり、構成部品を全て樹脂で作成することができた(特許出願)。このモータを 2 個取り付け付けた 2 自由度ロボットの開発を行った。図 4 にロボットを MRI 内に導入した概観を示す。

### (3) 画像情報・ロボット・術者の座標系統統合インターフェース

画像表示ディスプレイおよび穿刺ロボットと MRI 画像との位置姿勢座標の統合アルゴリズムの開発を行った。リアルタイム性を重視し、ここでは三次元位置計測器(Polaris, NDI 社製)による両デバイスと MRI 装置に取り付けたマーカの座標値を取得し、同次座標変換行列により対応付けを行った。デバイスの完全非磁性・非金属化することで画像歪は観測されなかったが、(2)のロボットについては穿刺により対象臓器が移動・変形することで十分な穿刺精度が得られなかったため(4)に値を示す)、ここでは MRI 画像に映る針をハフ変換により抽出し、ターゲットへの穿刺方向の修正を行う目標点追従システムを実装した。

### (4) ファントム実験等による評価結果

これまで、マニピュレータの MRI 対応性の定量的な評価については、マニピュレータ駆動時に撮像した画像中のアーチファクトの有無、S/N 比、歪みの評価が主であり、機器から発生する漏洩電磁波の影響について検討が十分には行なわれていない。特に MRI 近辺での漏洩電磁波強度の指標は未だない。そこで MRI の共鳴周波数帯域の電磁波が MRI 画像に与える影響の評価を行った。

実験結果より 0.2TMRI においては、ガントリ内で共鳴周波数帯域の漏洩電磁波の磁界強度が  $-62.44\text{dB}\mu\text{A}/\text{m}$  以下であれば画像に影響がないという結論を得た。これより、電磁波計測による MRI 対応性の評価を行うことで、MRI 画像の撮像時に漏えい電磁波がどの程度影響を与えるか評価可能とした。次に、それぞれのデバイスの評価について述べる。(1)および(3)について、画像重畳デバイスの

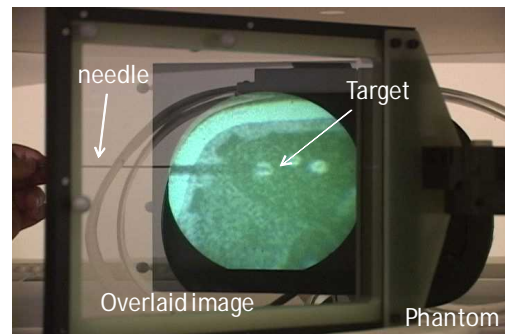


図 5 画像重畳デバイスによる穿刺実験

MRI 対応性の基礎評価およびシステムの総合的な誤差の評価を行った。デバイスを MRI 撮像時に使用していた状態での S/N 比低下は 1% 以内であり、画像の歪みやアーチファクトの発生がなかった。このことから、MRI 撮像時でも使用可能であることを示した。画像重畳表示の精度については、画面全体の平均が 1.2mm、画面中心から半径 60mm 以内の範囲では平均 0.4mm の精度で表示可能であった。また、デバイスを用いた腹部ファントムへの穿刺実験を行った結果、平均 3.9mm で穿刺可能であり、肝臓への穿刺手術を支援可能であることを示した。図 5 に穿刺実験の概観を示す。

(2)および(3)について、術者誘導追尾型ロボットの評価を行った。超音波モータを用いたコンピュータの MRI 対応性については、漏洩電磁波測定と MRI 画像を用いて定量的に評価を行った。漏洩電磁波強度及び画像の S/N 比低下は画像に影響を与えない範囲であった。また、金属部材の使用に起因するわずかな歪みが確認されたが、撮像中心においては影響が及ばず、実用上問題ない。これらの結果より、本コンピュータが 0.2 T オープン MRI の MRI ガントリ内で MRI 画像の撮像を行いながら使用可能であることを確認した。

術前画像を用いた腹部ファントムに対する穿刺精度評価実験では平均 2.5mm の誤差が生じた。そのため、画像処理による術中画像からの穿刺方向の軌道修正アルゴリズムにより穿刺をした結果、平均 0.8 mm の穿刺誤差となり精度が向上した。図 6 に針を穿刺する経過の画像を示す。術前画像のみでの位置決めでは穿刺対象が動く、針がたわむなどの理由で高精度な穿刺は行えなかったが、術中画像を用いることで高精度な穿刺を行えることが示されたといえる。MRI の Fluoroscopy による画像の更新速度は 2fps であり、軌道修正の時間もかかる。今後の高速化により、スムーズかつ正確な穿刺が実現出来ると考えられる。

空圧ステッピングモータによるロボットの評価を行った。画像の歪みおよび電磁波ノイズの発生は全く見られなかった。また、アーム先端部の位置決め誤差は 0.29mm と十分な精度が得られたが、1 ステップに 700ms かかるため、駆動速度が実用上は不足していた。今後は鋸歯の歯数や空圧などのパラメー

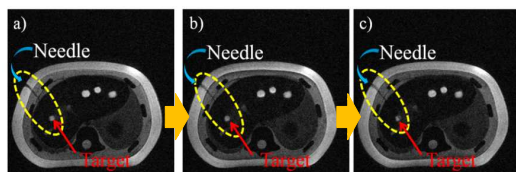


図 6 穿刺ロボットの誘導による針穿刺の様子

タの最適化を図る必要がある。

## 5. 結論

本研究では、豊富な情報を有するオープン MRI 下において手術情報と手術機械を融合した高精度治療システムを目指し、基盤技術としての画像重畳表示システムおよび穿刺ロボットシステムの研究を行った。また、基礎研究として、MRI 内に持ち込める電子機器類の許容電磁波漏洩強度の指針の提案を行い、また要素開発として、非磁性非金属材料から構成される画像表示装置および、動力となるアクチュエータの開発を行った。

これらの成果により、従来では不可能であった術中 MRI の画像を観察しながら直感的かつ定量的な治療を行える作業環境の構築が実現した。今後は、各デバイスのスペックの向上や、各デバイスを要素技術として盛り込んだ高度システムへの展開などが期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

正宗賢, 佐藤生馬, 舟久保昭夫, 土肥健純, MRI 下治療支援用断層画像オーバーレイ表示システムの開発, 日本コンピュータ外科学会誌. (in press), 査読あり

佐藤生馬, 長縄明大, 舟久保昭夫, 土肥健純, 正宗賢, MRI 対応画像誘導下手術支援コンピュータの開発及び電磁波対策に関する評価, 日本コンピュータ外科学会誌, Vol.10, No.4, pp.529-538, 2008. 査読あり

正宗賢, MRI 環境下における低侵襲手術支援システム, 日本機械学会誌, Vol.110, No.1058, pp.15-18, 2007, 査読なし

〔学会発表〕(計 11 件)

Ken MASAMUNE, Ikuma SATO, Hiromasa YAMASHITA and Takeyoshi DOHI, MR-SAFE SURGICAL DEVICES FOR ACCURATE IMAGE GUIDED SURGERY, 2009 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechanics for Information and Precision Equipment, Ibaraki, Japan, June 19th, 2009.

佐藤生馬, 舟久保昭夫, 廖洪恩, 山下紘正, 土肥健純, 正宗賢, オープン MRI 対応断層画像オーバーレイナビゲーションシステムによる穿刺精度の評価, 第 48 回日本生体医工学会大会, 東京, 2009 年 4 月 25 日

樫田知樹, 山下紘正, 廖洪恩, 土肥健純, 正宗賢, 空圧式鋸歯回転アクチュエータを用いた MRI 画像誘導下穿刺術支援コンピュータの基礎開発, J JSCAS, Vol.10, No.3, pp.337-338, Nov. 2<sup>nd</sup>, 2008

Ken MASAMUNE, Ikuma SATO, Hongen LIAO and Takeyoshi DOHI, Non-metal Slice Image Overlay Display System Used Inside the Open Type MRI, The 4th International

Workshop on Medical Imaging and Augmented Reality (MIAR 2008), LNCS 5128, pp.385-392, Tokyo, Japan, August 2<sup>nd</sup>, 2008.

Ikuma SATO, Akio FUNAKUBO, Takeyoshi DOHI and Ken MASAMUNE: EMC design of MR compatible needle guiding manipulator for 0.2 T open-type MRI, CARS 2008 Computer Assisted Radiology and Surgery 22nd International Congress and Exhibition, pp. S304-S305, Barcelona, Spain, June 26<sup>th</sup>, 2008.

佐藤生馬, 舟久保昭夫, 廖洪恩, 松宮潔, 土肥健純, 正宗賢, 0.2 T オープン MRI 対応機器開発のための EMC 設計に関する研究, 第 47 回日本生体医工学学会大会, 大阪, 2008 年 5 月 8 日.

正宗賢, 佐藤生馬, 土肥健純, MRI 下における手術支援システム, 日本医工学治療学会第 24 回学術大会, 横浜, 2008 年 4 月 20 日

佐藤生馬, 舟久保昭夫, 土肥健純, 正宗賢, MRI 対応 2DOF マニピュレータによる MRI 画像誘導下デバイス位置決めシステムの開発, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会, 東京, 2008 年 3 月 17 日.

Ikuma SATO, Akio FUNAKUBO, Hongen LIAO, Kiyoshi MATSUMIYA, Takeyoshi DOHI and Ken MASAMUNE. Development of an MRI compatible needle guiding manipulator with navigation system for Open-type MRI, 3rd Asian Conference on Computer Aided Surgery 2007 (ACCAS2007), pp.19 - 20, Singapore, Dec 2<sup>nd</sup>, 2007

Ken MASAMUNE, Ikuma SATO, Kiyoshi MATSUMIYA, Hongen LIAO, Takeyoshi DOHI, An Augmented Reality System for Open type MRI with Non-ferromagnetic Image Overlay Display, 3<sup>rd</sup> Asian Conference on Computer Aided Surgery 2007 (ACCAS2007), p.30, Singapore, Dec 2<sup>nd</sup>, 2007

佐藤生馬, 舟久保昭夫, 柳原忠政, 廖洪恩, 松宮潔, 土肥健純, 正宗賢, 実撮像時間による MRI 断層画像オーバーレイ表示システムの開発, 第 16 回日本コンピュータ外科学会大会, 広島, 2007 年 11 月 3 日

#### 〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: ステッピング・アクチュエータ

発明者: 正宗賢 他 3 名

権利者: 国立大学法人 東京大学

種類: 特許公開

番号: 2009-10893

出願年月日: 平成 19 年 11 月 1 日

国内外の別: 国内

#### 〔その他〕

ホームページ

<http://www.atre.t.u-tokyo.ac.jp/masa>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

正宗 賢 (MASAMUNE KEN)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号: 00280933

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし