

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：14202

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23300188

研究課題名(和文) シームレスMR画像誘導手術を可能とするハイブリッドナビゲーション法の研究

研究課題名(英文) A study of hybrid navigation system for seamless MR image guided surgery

研究代表者

森川 茂廣 (MORIKAWA, SHIGEHIRO)

滋賀医科大学・医学部・教授

研究者番号：60220042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円、(間接経費) 4,320,000円

研究成果の概要(和文)：通常の高磁場MR装置と磁石近傍で動作するMR対応穿刺支援ロボットを用いた新たな画像誘導手術システムを開発した。このシステムでは、MR画像撮像後、磁石外で位置合わせの操作なしに直ちにロボットを操作して標的を追尾し、穿刺ルートに沿った再構成MR画像を表示させ、標的への安全で最適な穿刺ルートの選択が可能であった。また穿刺後は、針の位置と方向の情報を記録し、磁石内で、位置決め画像なしに即座に穿刺結果を確認することができた。こうして、対象を磁石内外に移動してもシームレスなMR画像誘導手術が実現した。

研究成果の概要(英文)：A novel image navigation system has been successfully developed using a standard high-field MR system and an MR-compatible surgical robot to assist image-guided puncture. With this system, the robot automatically chased the preset target point immediately after the image acquisition without registration process. The safe and optimal puncture route could be selected while monitoring reconstructed images along the needle path. After the puncture of the target, the position and direction of the needle were recorded. MR images for the evaluation of the puncture could be immediately acquired without scout images. Thus, seamless MR image-guided surgical procedures were realized inside and outside the magnet.

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：低侵襲治療システム MR画像誘導システム 手術ロボット

1. 研究開始当初の背景

われわれは、手術監視用ダブルドーナツ型オープン MR 装置を導入し、400 例を超える MR ガイド下手術を行ってきた。中でも、肝腫瘍に対するマイクロ波凝固治療は 250 例を超え、MR に悪影響のないマイクロ波とインターアクティブに撮像面を設定するリアルタイム MR 画像による三次元ナビゲーションの組み合わせは、国内はもとより、世界的にも相性のよい優れた方法として注目を集めている (Morikawa S, et al. J Magn Reson Imaging 16:576-83, 2002, Acad Radiol 10:180-188, 2003, Acad Radiol 10:1442-1449, 2003)。さらに、科学研究費 (基盤(B) 17300171) の補助を受け、光学センサーと非磁性超音波モータを組み込み、MR 装置内で、指定したターゲットを自動追尾するロボットを製作し、既に 23 例の肝腫瘍への臨床使用を実施し、良好な結果を得た (Morikawa S, et al. Am J Surg 198: 340-347, 2009.) (図 1)。このロボットに関する仕事は 2010 年 9 月ライプチヒで開かれた Interventional MRI Symposium で最優秀ポスター賞を獲得するなど、高い評価を受けている。



図 1 オープン MR 装置でのロボットを使った肝腫瘍マイクロ波凝固手術

MR 画像は、軟部組織コントラストに優れ、X 線被曝がなく、あらゆる撮像面を設定できるなど低侵襲治療手技の画像ガイドとして多くの利点を有するものの、高額な装置や特殊な手術機器を必要とする上、長時間を要する煩雑な手技のため、期待したほどには普及していないのが現状である。世界的に見ると 2000 年頃には、0.3-0.5T の低～中磁場の開放型 MR 装置が主として用いられていたが、高解像度、高コントラストの画像の要求とともに、世界の先端施設では 1.5T や 3T の高磁場 MR 装置を用いた画像ガイド手術へと移行しつつある。

われわれのダブルドーナツ型オープン MR 装置も導入から既に 10 年以上が経過し、システムの老朽化とともに、次世代の MR ガイド手術に対応していく必要に迫られている。しかし、1.5T 以上の装置は、従来どおりのトンネル型であるため、患者へのアクセスは制限され、内視鏡やロボットの使用、あるいは IN and OUT 方式など高磁場装置に適合した、ナビゲーションシステムが要求されている。

2. 研究の目的

本研究は、オープン MR 装置で行ってきた MR ガイド下低侵襲治療をトンネル型の高磁場磁気共鳴 (MR) 装置において有効に行えるよう、電磁式・光学式ハイブリッド型トラッキングセンサを製作し、IN and OUT 方式であっても、標的追尾ロボットを活用して、レジストレーションなどの煩雑な操作なしに、シームレスに簡便な低侵襲手術を行うことの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的としている。

3. 研究の方法

通常の MR 装置を用いて画像ガイド手術を行うため、位置センサーとして、撮像中の傾斜磁場を感知する電磁式トラッキングシステム EndoScout、光学式トラッキングシステム Polaris を導入した。また磁石の近傍で MR 画像をモニターしながら手術操作が行えると共に、MR 撮像にノイズなど悪影響を及ぼさない、シールドした非磁性の液晶モニターを導入し、光学式画像伝送システムにより、操作室のコンピュータのナビゲーション画面を磁石室内でモニターできるように整備した。オープン MR で使用していた標的追尾ロボットは、Polaris を使用して、位置と方向をモニタリングできるよう改造した。Polaris センサーは、マグネット正面、ロボットハンドピース、動物ベッドの 3 箇所に設置するとともに、EndoScout、Polaris のハイブリッドセンサーを準備して、マグネット (3D イメージ) の座標系、ロボットの座標系、動物ベッドの座標系を統合した (図 2)。

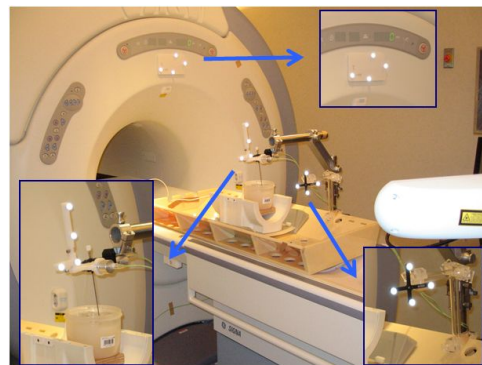


図 2 マグネット、ロボット、ベッドに取り付けた位置センサー

このナビゲーションシステムでは、3D の MR 画像を撮像後に、テーブルを引出し、ロボットに標的の 3 次元的位置座標を指示すると、直ちにナビゲーションを開始することを可能とする。術者は、従来と同様、ハンドピースの方向を任意に変化させると、Remote-Center-of-Motion (RCM) Control の制御により、針先は常に標的に向かい、リアルタイム画像は表示できないが、穿刺経路に沿った再構成画像を提示する。そこで、ニードルガイドに沿って設定した長さだけマニュアルに穿刺を行うと設定部位に到達できる。穿刺結果の確認には、再度マグネット内

に対象を挿入してMR撮像を行う必要があるが、この確認画像の撮像も速やかに穿刺針に沿った撮像面の設定を可能とする。

さらに、穿刺の利便性により動物ベッドを移動・回転する必要が生じても、再度のキャリブレーションをすることなく穿刺操作を続行することのできる Motion Compensation の機能を追加する。

4. 研究成果

位置センサーとして導入した Polaris、EndoScout は目的通り有効に機能し、それらのハイブリッドセンサーにより、2つのセンサーシステムの情報統合も実現することができた。標的追尾ロボットはもともとマグネット内で使用していたもので、MR Compatibility には全く問題なく動作した。台座部分を改造し、マグネットボアの出口近傍に容易に着脱することを可能とし、ロボット使用時以外は全く通常のMR装置としての利用できた。ロボットは Polaris をセンサーとして生まれ変わり、そのキャリブレーションは約2分間で自動的に行うことができ、時間的な余裕のない場合には、3DのMR撮像の前に済ませておくことも可能となった。

このシステムでは、操作をMRの近傍で行い、確認のMR撮像も行うため、手術器具や穿刺針のMR対応性には注意を払う必要があるものの、体表マーカを用いて位置合わせのための煩雑な操作を行わなくても、直ちにナビゲーションの操作を開始でき、しかも、術者がハンドピースの方向を変えると、即座に穿刺ルートに沿った再構成画像が提示されるので、障害物や危険物のない最適なルートを容易に選択することができた(図3)。

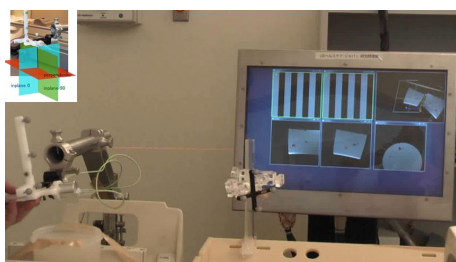


図3 穿刺経路に沿った画像提示

またハンドピースはしっかりと固定され、手持ちの器具による穿刺より正確で安定していた。寒天ファントムと15cmの穿刺針を用いた実験では、穿刺の誤差は約2mm程度で十分な精度が得られた。この結果は、2012年9月にボストンで開催された第9回 Interventional MRI Symposium で発表し、高い評価を受けた。

このシステムは、いつでも針の先端位置と方向の情報を記録してMR装置にその情報を転送することができ、穿刺針を対象物に留置したまま、マグネット内に移動させ、位置決め画像なしに針の進行方向に一致した穿刺結果の確認のためのMR撮像ができ、マグネットの内外を移動させるナビゲーションを

円滑に行えた(図4)。

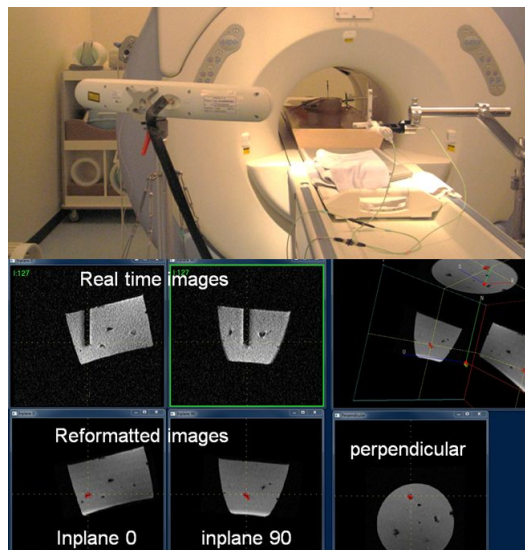


図4 穿刺後の確認画像。針を留置したまま磁石に対象を挿入し直ちに針に沿った撮像を行う。

その後 Motion Compensation の機能を実現し、動物ベッドを移動・回転させ、キャリブレーションを行わない場合でも、穿刺の誤差は、約3mmとやや増加したが、それでも十分な精度が得られた。この成果は、2013年9月に東京で開催されたアジアコンピュータ外科学会(ACCAS 2013)で発表し、Best Paper Award を受賞した。

当初の計画では、動物実験によりこのシステムの有用性を検証する予定であった。しかし、このシステムの一の弱点は、穿刺をブラインドで行わなければならないことであり、確認のための撮像が必須であり、シームレスとはいえ、そのための時間と、穿刺針を留置したままの動物を移動させねばならなかった。そこで、穿刺中の針先の位置をリアルタイムにモニターできるよう、タブレット型の超音波診断装置を導入し、現状のロボット設置場所で正常に動作することを確認した上で、再構成MR画像と超音波画像の両者を併用するナビゲーションシステムの開発に着手した。研究成果として、その基本的なアイデアと構造について特許を出願した(特願2014-30656)。

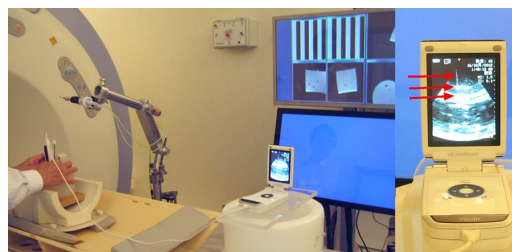


図5 MR近傍のロボット設置場所で動作する超音波装置

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計22件)

1. Yanagisawa D, Taguchi H, Ibrahim

- NF, Morikawa S, Shiino A, Inubushi T, Hirao K, Shirai N, Sogabe T, Tooyama I. Preferred features of a fluorine-19 MRI probe for amyloid detection in the brain. *Journal of Alzheimer's Disease* 39(3):617-31, 2014. (査読有)
2. Irie T, Oda K, Shiino A, Kubo M, Morikawa S, Urushiyama N, Aonuma S, Kimura T, Inubushi T, Ohashi T, Komatsu N. Design, synthesis, and preliminary ex vivo and in vivo evaluation of cationic magnetic resonance contrast agent for rabbit articular cartilage imaging. *Med Chem Commun* 4: 1508-1512, 2013. (査読有)
 3. Tagawa K, Tanaka HT, Kurumi Y, Komori M, Morikawa S. Laparoscopic surgery simulator using first person view and guidance force. *Stud Health Technol Inform.* 2013;184:431-5. (査読有)
 4. 田川和義、来見良誠、小森優、森川茂麿、田中弘美 臓器異型パリエーションの構成的多重解像度モデリング 電気情報通信学会論文誌 D J96-D: 1365-1373, 2013. (査読有)
 5. Morikawa S, Murayama H, Fujimoto S, Shiino A, Inubushi T. A simple way to acquire T₁-weighted MR images of rat liver with respiratory triggering. *Magn Reson Imaging* 30: 453-458, 2012. (査読有)
 6. Shiino A, Watanabe T, Shirakashi Y, Kotani E, Yoshimura M, Morikawa S, Inubushi T, Akiguchi I. The profile of hippocampal metabolites differs between Alzheimer's disease and subcortical ischaemic vascular dementia, as measured by proton magnetic resonance spectroscopy. *J Cereb Blood Flow Metab* 32, 805-815, 2012. (査読有)
 7. Shiino A, Yamauchi H, Morikawa S, Inubushi T. Mapping of cerebral metabolic rate using DSC and BOLD MR imaging: a preliminary study. *Magn Reson Med Sci* 11: 109-115, 2012. (査読有)
 8. Wang Z, Wang L, Ho VA, Morikawa S, Hirai S. A 3D Non-Homogeneous FE Model of Human Fingertip Based on MRI Measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (TIM)* 61: 3147-3157, 2012. (査読有)
 9. Morikawa S, Naka S, Shiomi H, Murayama H, Murakami K, Tani T, Kurumi Y, Haque A H, Inubushi T. Development of instruments to assist accurate puncture of liver tumors for MRI-guided microwave ablation -From a simple spacer to a motorized robot- *J Microwave Surg* 30:183-190, 2012. (査読無)
 10. Zhao L, Chano T, Morikawa S, Saito Y, Shiino A, Shimizu S, Maeda T, Irie T, Aonuma S, Okabe H, Kimura T, Inubushi T, Komatsu N. Hyperbranched polyglycerol-grafted superparamagnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, characterization, functionalization, size separation, magnetic properties, and biological applications. *Adv Funct Mater* 22: 5107-5117, 2012. (査読有)
 11. 田川和義、田中弘美、小森優、来見良誠、森川茂麿 一人称視点映像と誘導力提示による腹腔鏡下手術手技のVR訓練システム 日本VR医学会論文誌 10:11-18, 2012. (査読有)
 12. Wang Z, Abe Y, Hirai S, Morikawa S. A 3D FE Dynamic Model of Human Fingertip Based on MRI Data, Proc. 2011 IEEE Int. Symp. on Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE 2011), pp.8-12, (査読有)
 13. Fujimoto S, Morikawa S, Inubushi T. An MR Comparison Study of Cardiogenic and Noncardiogenic Pulmonary Edema in Animal Models. *J Magn Reson Imaging* 34: 1092-1098, 2011. (査読有)
 14. Yamaguchi S, Satake K, Morikawa S, Shirai Y, Tanaka HT. Needle insertion simulation by arbitrary Lagrangian-Eulerian method. *Studies in Health Technology & Informatics.* 163:710-2, 2011. (査読有)
 15. Yanagisawa D, Amatsubo T, Morikawa S, Taguchi H, Urushitani M, Shirai N, Hirao K, Shiino A, Inubushi T, Tooyama I. In vivo detection of amyloid β deposition using ¹⁹F magnetic resonance imaging with a ¹⁹F containing curcumin derivative in a mouse model of Alzheimer's disease. *Neuroscience* 184:120-127, 2011. (査読有)
 16. 森川茂麿、来見良誠、仲成幸、塩見尚礼、村山浩之、村上耕一郎、Hasnine A Haque、犬伏俊郎、谷徹 マイクロ波と磁気共鳴画像のめぐり合い *J Microwave Surg* 29:33-38, 2011. (査読無)
- [学会発表](計83件)
1. Marutani T. An Analysis of Expert's Hand Movements based on Surgical Process model in Laparoscopic Surgery Training. 20th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer

- Vision, 2014. 2. 4-6. Okinawa.
2. Marutani T. Trainee's Action Archiving System for Supporting Laparoscopic Surgery Training. International Conference on 3D Systems and Applications (3DSA2013) Osaka, June 26-28, 2013.
 3. Komori M. Current Status of Organ Variation 3D Model Library Construction. 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE-EMBC2013) July, 3-7, 2013. Osaka
 4. Tagawa K. A Semi-Automatic Modeling Approach for Serosa and Adhesion. 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE-EMBC 2013) July, 3-7, 2013. Osaka.
 5. Morikawa S. An MR image navigation system for a closed bore scanner with a needle insertion manipulator. 9th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS 2013) 2013. 9. 16-18. Tokyo. Best Paper Award
 6. Morikawa, S. MR image guided microwave ablation of liver tumors. -From a low field open-configuration system to a high field closed-bore system- 9th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics Oct 31- Nov 1, 2013, Kyoto. (Invited)
 7. Kato T. Evaluation of Haptic Training Methods for Laparoscopic Surgery Skill Transfer. 9th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics. (MPR2013) 2013. 10. 31 - 11. 1 Kyoto.
 8. Marutani Y. A Study on Transferring Veteran's Laparoscopic Surgical Techniques based on Surgical Process Model by Using Trainee's Action Archiving System. 9th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics. (MPR2013) 2013. 10. 31 - 11. 1 Kyoto.
 9. 仲成幸 MR 画像誘導による Simulation/Navigation Surgery 第 113 回 日本外科学会定期学術集会 2013 年 4 月 11-13 日 福岡市
 10. 仲成幸 肝細胞癌に対する MR 画像誘導下マイクロ波凝固療法 第 32 回 Microwave Surgery 研究会 2013 年 9 月 13-14 日 東京都
 11. 森川茂廣 通常 MR 装置と穿刺支援ロボットを組み合わせたシームレス画像ナビゲーション 第 41 回日本磁気共鳴医学会大会 2013 年 9 月 19-21 日 徳島市
 12. 仲成幸 MR 画像誘導下内視鏡手術システムの開発 第 41 回日本磁気共鳴医学会大会 2013 年 9 月 19-21 日 徳島市
 13. 加藤十磨 腹腔鏡下手術訓練のための、力覚提示システムの検討 第 18 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 大阪市 2013 年 9 月 18 日 ~ 20 日 .
 14. 丸谷宜史 腹腔鏡下手術訓練支援のためのデプスセンサおよび 3 次元力覚提示デバイスを用いた訓練者手技の観測・提示手法の検討, 第 13 回 VR 医学会学術大会, 寝屋川市, 2013 年 8 月 31 日 .
 15. Haque HA. Intraoperative MR Image Guided Endoscopic Surgery on a Closed Bore MR Scanner. ISMRM 20th Annual Meeting & Exhibition. 5-11, May 2012, Melbourne, Australia. (Second Place Poster Award in Interventional Study Group)
 16. K. Tagawa. Expression of cystohepatic duct anomaly using modular structured organ model in a laparoscopic surgery simulator. The 26th International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2012), Pisa, Italy, 6. 27-30. 2012.
 17. S. Naka. MR-image guided surgical system for endoscopic surgery. The 26th International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2012), Pisa, Italy, 6. 27-30. 2012.
 18. Morikawa S. Seamless MR image navigation system using a motorized manipulator with optical and electromagnetic sensors for a closed bore scanner. 9th Interventional MRI Symposium, 2012. 9. 22-23. Boston.
 19. Haque HA. Technical Development of Endoscopic Surgery with Near Real-time MRI Guidance. 9th Interventional MRI Symposium, 2012. 9. 22-23. Boston.
 20. Naka S. MR-Image Guided Endoscopic surgery - Initial Animal Study -. 9th Interventional MRI Symposium, 2012. 9. 22-23. Boston.
 21. Ohmi N. Constructive Multi-Resolution Kodeling for Expressing Cysthepatic Duct Anomaly in a Laparoscopic Surgery Simulator. The 8th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2012) 2012. 10. 16-17. Fukuoka.
 22. 仲成幸 MR 画像誘導下手術システムの開発 - 汎用化を目指した取り組み - 第 112 回日本外科学会定期学術集会 2012.4.12-14 千葉
 23. 森川茂廣 ^1H -MR イメージング用アレイコイルを利用した ^1H 検出 ^{13}C -MR 工

- コープラナー spektroskopische Imaging の試み 第 16 回 NMR マイクロイメージング研究会 2012.8.2-3 大津市
24. 田川和義 臓器異型に対応した腹腔鏡手術シミュレータの構築 日本 VR 医学会大会 2012.8.25 千葉
 25. 仲成幸 NOTES における新しい誘導システムの開発 第 67 回日本消化器外科学会総会 2012年7月18日 20日 富山市
 26. 仲成幸 MR 画像誘導下における Gd-EOB-DTPA 造影 MRI の有用性 第 67 回日本消化器外科学会総会 2012年7月18日 20日 富山市
 27. 谷徹 MR 画像誘導下手術システムの開発 さらなる手術成績の向上と低侵襲性を求めて 第 67 回日本消化器外科学会総会 2012年7月18日 20日 富山市
 28. 仲成幸 MR 画像誘導下内視鏡手術システムによる肝癌治療 第 48 回日本肝癌研究会 2012年7月20日 21日 金沢市
 29. 仲成幸 MR 画像誘導下手術システムによる肝癌治療 日本消化器病学会近畿支部 第97回例会 2012年9月1日 京都市
 30. 加藤十磨 重畳映像力提示を用いる腹腔鏡下手術手技訓練システムの提案とその学習効果 第 17 回日本 VR 学会 2012. 9. 12-14. 横浜市
 31. Tagawa K. An efficient detachment simulation method using online re-mesh and rectangular tetrahedral volume mesh. Machine Perception and Robotics. 2011.10.13-14, 北京.
 32. 森川茂廣 MR 画像ガイド手術における穿刺支援ロボットの臨床応用 (シンポジウム「ロボット医療」招待) 第 28 回日本医学会総会 2011年6月 Web 開催
 33. 森川茂廣 MR 画像誘導下低侵襲治療の開発と臨床経験 (ワークショップ「先進治療機器の臨床経験と課題」招待) 第 86 回日本医療機器学会大会 2011年6月2日 4日 横浜市
 34. 小森優 腹腔鏡手術シミュレータのための臓器異型モデル構築 第 11 回日本 VR 医学会学術大会 生駒市 2011年8月27日
 35. Naka S. Image guided liver surgery using robot manipulator. 第 26 回生体・生理工学シンポジウム 2011年7月9日 10日 草津市
 36. Hasnine A Haque Development of cyber MR operating room for intraoperative MRI guided surgery. 第 20 回日本コンピュータ外科学会大会 2011年11月22日 24日 横浜

37. 仲成幸 NOTES における画像誘導の有用性 - NOTES の適応拡大を目指した取り組み- 第 24 回 日本内視鏡外科学会総会 2011年12月7日~9日 大阪
38. 森 厚郎 MRI ガイド手術のための穿刺軌道の計測 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 2011.12.24 京都
39. 仲成幸 MR Image ガイド下肝腫瘍凝固療法における Gd-EOB-DTPA の有用性 第 23 回日本肝胆膵外科学会学術集会 2011年6月8-10日 東京
40. 仲成幸 ここまで出来る NOTES MR 画像誘導による NOTES の可能性 第 73 回日本臨床外科学会総会 23年11月17-19日 東京都

〔図書〕(計5件)

1. Morikawa S, Naka S, Murayama H, kurumi Y, Tani T, Haque HA. MRI-Guided Microwave Ablation. In: Interventional Magnetic Resonance Imaging Kahn T, Busse H.(Eds.) Springer Berlin Heiderberg 2012, pp. 389-402.
2. Haque AH, Morikawa S, Naka S, Kurumi Y, Murayama H, Tani T, Tsukamoto T. Simultaneous Endoscopy and MRI Acquisition. In: Interventional Magnetic Resonance Imaging Kahn T, Busse H.(Eds.) Springer Berlin Heiderberg 2012, pp. 471-479.

〔産業財産権〕

出願状況 (計2件)

名称：穿刺支援装置
 発明者：森川茂廣、仲成幸、山田篤史
 権利者：滋賀医科大学
 種類：特許
 番号：特願 2014-30656
 出願年月日：平成 26 年 2 月 20 日
 国内外の別：国内

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
 森川 茂廣 (MORIKAWA SHIGEHIRO)
 滋賀医科大学・医学部・教授
 研究者番号：60220042
- (2) 研究分担者
 仲 成幸 (NAKA SHIGEYUKI)
 滋賀医科大学・医学部・准教授
 研究者番号：10359771
 来見 良誠 (KURUMI YOSHIMASA)
 滋賀医科大学・医学部・教授
 研究者番号：70205219