

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：14202

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26282145

研究課題名(和文)MR・超音波統合画像誘導による標的追尾ワンステップ穿刺支援ロボットの構築

研究課題名(英文)Development of a target-chasing robot system integrating MR and ultrasound image navigation to assist needle insertion

研究代表者

森川 茂廣(Morikawa, Shigehiro)

滋賀医科大学・神経難病研究センター・客員教授

研究者番号：60220042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：高磁場MR装置によるMR画像と、リアルタイム性に優れた超音波画像を併用した画像ナビゲーションシステムと、標的追尾機能を有するMR対応穿刺支援ロボットを統合した手術支援システムを構築した。MR装置は、GE社1.5TとSiemens社3Tシステムを使用、3Dデータを撮像した後、患者テーブルを引き出し、標的部位の座標を指定すると、体表マーカーによるレジストレーションなどの煩雑な操作なしに、光学式位置センサを有するロボットが標的を自動的に追尾し、リアルタイムの超音波画像と同一断面の高精細再構成MR画像をモニタしながら穿刺を行うものである。このシステムを用いてウサギを使った動物実験を行った。

研究成果の概要(英文)：An integrated surgical navigation system using image guidance by both MR images with a closed bore scanner and real-time ultrasound images, and a motorized manipulator for targeting was developed to assist image-guided needle insertion. A GE 1.5 T scanner and a Siemens 3T scanner were used. After 3D MR image acquisition, patient table was pulled out. A motorized manipulator with an optical tracking system automatically chased the target point without a time-consuming registration process using surface markers. A surgeon could insert a needle while monitoring both real-time ultrasound images and reformatted MR images in the corresponding image plane. This system was applied to the animal experiment using rabbits.

研究分野：外科学、医用工学、磁気共鳴医学

キーワード：手術ロボット 画像ナビゲーション MR画像 超音波画像

1. 研究開始当初の背景

われわれは、ダブルドーナツ型の 0.5T オープン MR 装置を導入し、300 例を超える MR 画像ガイド下経皮的肝腫瘍マイクロ波凝固治療を行うとともに、光学センサと非磁性超音波モータを有し、指定した標的を自動的に追尾する MR 対応穿刺支援ロボットを開発し、23 例の肝腫瘍の治療に応用して良好な結果を得た (引用文献、科学研究費 17300171, H17-19)。しかし、オープン MR 装置の磁場は比較的 low、その解像度に限界があるとともに、その普及は限定的であった。そこで、この治療システムの汎用性と有用性を高めるために、一般に普及しているトンネル型の高磁場装置を利用したピットイン・ピットアウト方式への改良を行った (科学研究費 23300188, H23-25)。画像の解像度は向上し、ロボットによる標的の追尾も十分な精度を達成したが、やはり穿刺を行う際に、穿刺針の弯曲や、標的位置の偏移が起こりうる。生検や温熱凝固治療を行う前には、再度マグネットの中に移動しての撮像を行って針先位置を確認する必要があるため、このために煩雑な手技と余分な時間を余儀なくされた。そこでこのシステムに、リアルタイムに針先位置を確認できる超音波診断装置を組み合わせることとした。

2. 研究の目的

通常の高磁場 MR 装置による高精細コントラストを有する MR 画像と、ポータブルでリアルタイム性に優れた超音波画像を併用した画像ナビゲーションシステムと、標的追尾機能を有する MR 対応穿刺支援ロボットを統合し、体表マーカを用いる煩雑なレジストレーションなどの操作なしに迅速で安定したイメージガイド下穿刺を可能とする、統合画像誘導による標的追尾ワンステップ穿刺支援ロボットの開発を目指す。

3. 研究の方法

(1) 研究当初は動物実験用に導入した、一般臨床用の GE 社 1.5T SIGNA Excite を用いたシステムの開発を行った。しかし、2015 年度途中からこの装置が不調をきたし、諸般の事情から廃棄されるに至った。その後、同じく実験用として導入した大口径の Siemens 社 3T MAGNETOM Verio を開発環境として使用できるようになった。そのために仕様的大幅な変更を余儀なくされ、研究に大幅な遅れを生じ、当初 2016 年度までの 3 年間の研究期間を 2017 まで延長することになってしまった。しかし一方では、この穿刺支援ロボットシステムが、1.5T でも 3T でも使用可能であることが証明され、その汎用性を示すことができた。

(2) 超音波診断装置

このシステムに利用する超音波装置の条件として、ハードディスクではなく SSD

で起動して強磁場環境でも使用できるシステムであること、磁石室内外への移動が容易であること、重畳画像表示などのプログラム開発のために超音波画像の外部出力ポートを有することの 3 つが考えられた。これらの要件を満たすものとして GE 社の Venue 40 を導入した。しかし、この超音波装置のトロリー部分には、高さを調整するための磁性体の鉄製部品が大量に含まれていたため、これらを除去し非磁性体のアルミ合金でトロリーを製作した (図 1)。

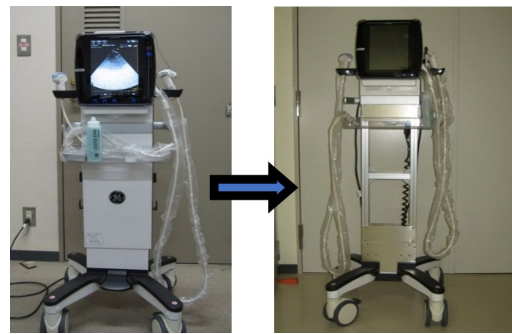


図 1 磁性体部品を取り除いた超音波装置のトロリー

タブレット型超音波装置自体には、コネクター、ネジ、電池など交換が極めて難しい部品があり、本体部分を改造することは不可能であったが、プローブ内には磁性体は含まれていなかった。トロリーの改造のみで 1.5T の装置でも 3T の装置でも、超音波装置は、マグネット開口部から約 1m 離れた部分に設置し、開口部から約 50cm の部位の対象物の超音波画像を問題なく観察することができた (図 2、図 3)。



図 2 1.5T MR 装置近傍で動作する超音波装置



図 3 3T MR 装置近傍で動作する超音波装置

(3) 光学式位置センサ

トンネル型のMR装置に適用できる光学式位置センサとして、Polaris Spectra (NDI) を使用、反射球のついた3つの passive marker をそれぞれマグネット正面、患者ベッド、ロボットハンドピースに設置した(図4, A, B, C)。あらかじめ、磁石正面のマーカの座標系とMR撮像の座標系との関係を計測しておき、これをリファレンスとして使用することによって、体表マーカーによるレジストレーション不要のワンステップナビゲーションを可能とした。

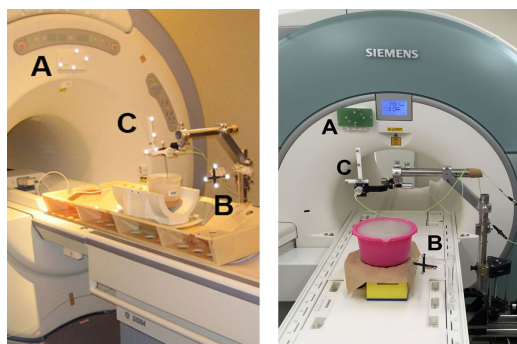


図4 光学式位置センサのための3つのマーカー。左は、1.5T GE SIGNA Excite、右は3T Siemens Verio に設置したもの。(A)マグネット正面、(B)患者ベッド、(C)ロボットハンドピース用。

(4) 穿刺支援ロボットの改良

MR 対応穿刺支援ロボットは、オープンMRで臨床に使用していた、非磁性の超音波モータと光学式角度センサを有するシステムを少し改造して使用した。まずハンドピース部分を超音波プローブ把持できるように改造するとともに、必要な時には穿刺したままで穿刺針をハンドピースからリリース可能な機構とした(図5)。また、対象の表面に超音波プローブが密着するように、氷嚢に水を満たしたものに超音波検査用ゼリーを塗り対象との間に挟み込んだが、様々な穿刺角度に対応しやすいようにプローブを45度刻みに任意の方向に簡単に回転できる機構も追加した(図6)。こうして超音波プローブを把持したハンドピースは、指定された標的位置を自動追尾し、穿刺針は常に標的に向かうよう制御された(図7)。



図5 超音波プローブ把持のためのハンドピースの改造。スリットが設けてあり、必要な時には穿刺したままでロボットハンドピースから針をリリースできる。

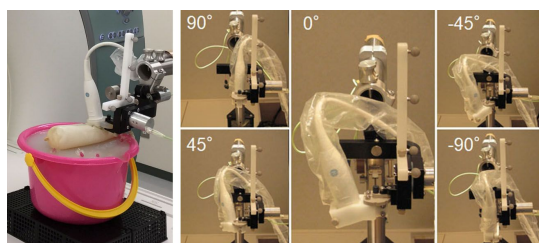


図6 超音波画像の観察のために水を満たした氷嚢をプローブと対象との間に挿入(左)、いろいろな穿刺角度にも対応できるように、ニードルガイドを中心としてプローブを45度刻みで簡単に回転できるようにした。

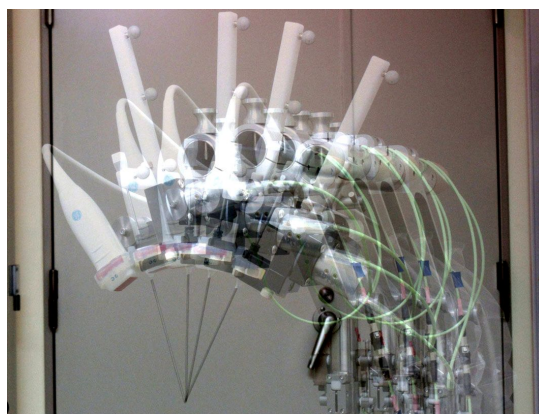


図7 超音波プローブを把持したロボットハンドピースの制御。ハンドピースの向きを変えても穿刺針の先端は常に指定した標的位置に一致している

(5) ソフトウェアの改良

ロボット制御プログラムは、新しい光学式センサの情報をもとに制御されるとともに、マーカーが患者ベッドについてさえいれば、単にマグネット内外の平行な出し入れだけでなく、ベッドが回転しても、ナビゲーションに対応できるようにした。またターゲットは対象から少し離れたところで行われるため、穿刺ラインが決まればその方向を維持したままハンドピースを対象に近づけ、超音波プローブが水を満たした氷嚢を挟んで対象表面に接触できる位置まで任意の距離で移動できる機能を有している。

ナビゲーションソフトは、撮像した3次元MR画像をもとにロボットによって誘導される穿刺針の座標系に基づく直交3断面の画像を表示するとともに、図6に示したような、穿刺角度によって超音波プローブを回転させた場合にも、それに合わせて再構成断面を回転させることができる機能も追加した。超音波画像は、DVIポートから外部に取り出し、Signal Converter (Epiphan) を通してUSBポートからナビゲーションソフトのPCに取り込んで表示するとともに、OpenCVを使って、回転、移動、縮小して対応する再構成MR画像に重畳表示した。

これらのナビゲーション画像は上下2段のMR対応液晶パネルに表示させた。図8に一例を示す。上段(A)のパネルには、穿刺針の進行方向を含み超音波画像と一致する断面

(inplane90)とそれに直交する面(inplane0)、穿刺針と垂直の断面(perpendicular)の3面の再構成画像が表示され、ターゲットは赤色で表示している。下段(B)のパネルには、超音波画像、その断面に一致する inplane90 の MR 再構成画像、それらを位置合わせして重ねた重畳画像を表示している。

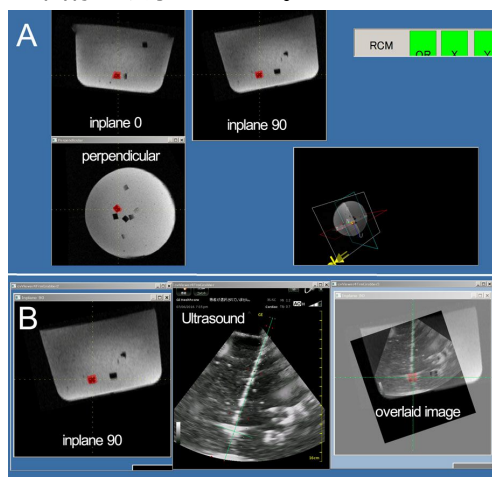


図 8 MR 対応液晶パネルに表示されるナビゲーション画像。上段(A)には穿刺針の座標をもとにした直交 3 断面の MR 再構成画像が提示され、下段(B)には、穿刺針が標的に到達した超音波画像 (中央)、その面に一致する MR 再構成画像 (左)、重畳画像 (右)を表示している。

このシステムの精度検証のためには、梱包材の直径 10mm の円盤型の気泡を寒天の中に包埋したファントムを準備して、12 か所の標的に穿刺した。3D MR 画像を再度撮像し、14G の針でできた穿刺経路の寒天の欠損から MPR 画像 (図 9) を構成して、誤差評価を行った。

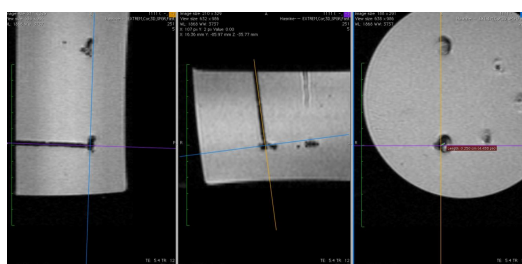


図 9 誤差評価のための穿刺経路に基づく MPR 画像

本研究の最終目標は、このシステムを動物に応用することであり、フォーレンによる全身麻酔下でウサギ (New Zealand White) を用いた穿刺実験を行った。超音波画像の撮像に関して予備実験を行ったところ、これまで使用してきたセクタ型のハンドピースは、深い位置に適したもので、ウサギのようなサイズの動物でも良好な画像が得られなかった。そこで、浅い部分にも適用できるコンベックス型、あるいはリニア型プローブをロボットハンドピースに固定するためのアダプター (図 10 A, B) を新たに製作し、部位や標的によって 3 種の超音波プローブを選択して使い分けできるようにした。各プローブ用

に、超音波画像と再構成 MR 画像を重畳表示するソフトウェアも整備した。

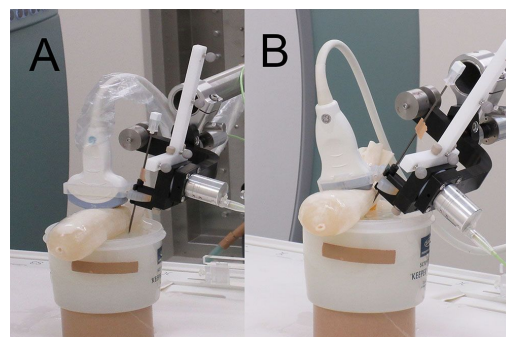


図 10 (A) コンベックス型、(B) リニア型超音波プローブを把持した穿刺支援ロボット

4. 研究成果

作製した標的追尾ロボットで 15cm の穿刺針を使用した場合、1.5T のシステムでは、 1.60 ± 1.01 (0.56 ~ 4.15) mm (mean \pm SD, range) 3T のシステムでは、 1.82 ± 0.67 (0.95 ~ 3.15) と、十分な精度を示した。

ファントムによる正確性、安全性、信頼性についての検討を行った後、ウサギを用いた動物実験を行った。当初は、臨床での肝腫瘍マイクロ波温熱凝固を想定して、肝臓をターゲットとする予定であったが、ウサギの肝臓は扁平でこうもり傘のような形で横隔膜の下に隠れており、超音波画像での描出が困難であった。そこで、左右の腎臓をターゲットとすることとした。またウサギの腎臓は皮下 4-5cm 程度の部位に位置しており、リニア型のプローブではプローブ接触面と針の穿刺角度が急峻すぎるため、コンベックス型のプローブを使用することとした。図 11 はこの穿刺支援システムを使ったウサギの穿刺実験の様子である。上下 2 段の液晶パネルに表示されるナビゲーション画像は、図 12 に示すとおりで、上段の直交する 3 面の MR 再構成画像では中心に腎臓が明瞭に描出されるとともに、ロボットの現在の操作モードが提示される。下段の超音波画像では、腎臓に到達する穿刺針がモニターでき、重畳画像でも MR 画像と超音波画像がよく一致していた。実際の穿刺操作中の超音波画像では腎臓の位置が大きく移動するのが観察され、このようなターゲットをブラインドで穿刺すること自体無理があり、超音波画像のリアルタイムモニタリングは必須であると考えられた。ただ一方では、穿刺作業中は安全のためロボットの超音波モータは停止しており、ハンドピースの角度だけでターゲットの移動に追従しようとする、やはり制約を受けた。またこの場合、腎臓は後腹膜の大量の脂肪に取り囲まれており、ロボットを使用したデリケートな穿刺経路の選定の必要性は低いと考えられる。このシステムは、血管、消化管、神経など損傷を避ける必要のある重要な組織に取り囲まれ、大きく移動することのない標的に適用すべきものと考えられた。

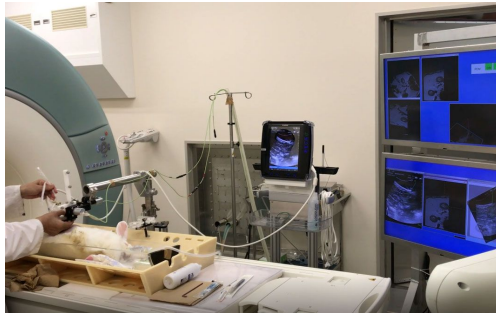


図 11 ウサギを使った穿刺支援ロボットシステムによる穿刺実験

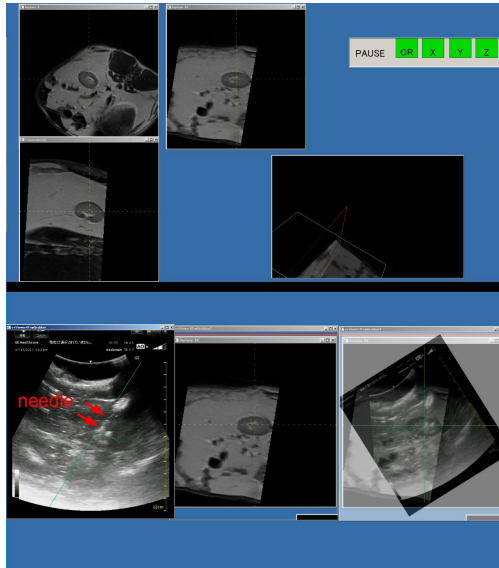


図 12 ウサギ腎臓穿刺のためのナビゲーション画面。上段には穿刺経路と腎臓（ターゲット）を中心とする直交3断面の再構成MR画像とロボットの操作モード、下段には、超音波画像、対応断面のMR画像、および重畳画像が表示され、超音波画像には穿刺針も観察されている。

<引用文献>

Morikawa S, Naka S, Murakami K, et al. Preliminary Clinical experiences of a motorized manipulator for magnetic resonance image guided microwave coagulation therapy of liver tumors. *Am J Surg* 198: 340-347, 2009.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 35 件)

Yamada A, Naka S, Nitta N, Morikawa S, Tani T. A Loop-Shaped Flexible Mechanism for Robotic Needle Steering. *IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS*, 3:648-655, 2018. (査読あり)

DOI: 10.1109/LRA.2017.2779273

Tani T, Naka S, Tani S, Shiomi H, Murakami K, Yamada A, Khiem DT: Invention of microwave surgical scissors for seamless coagulation and cutting, *Surgery Today*, 2018. (査読あり) DOI: 10.1007/s00595-018-1662-7.

山田篤史, 仲成幸, 森川茂麿, 新田哲久, 谷徹: 弾性アームに基づく操舵可能な針の屈曲機構, *日本ロボット学会誌*, 36(7): 539-547, 2017. (査読あり) DOI:10.7210/jrsj.35.539

山田篤史, 仲成幸, 森川茂麿, 谷徹. 内視鏡や針に利用可能な弾性アームに基づく屈曲・伸展機構. (査読あり) *日本コンピュータ外科学会誌* 19:5-16, 2017.

Marutani T, Kato T, Tagawa K, Tanaka HT, Komori M, Kurumi Y, Morikawa S. Active and Passive Haptic Training Approaches in VR Laparoscopic Surgery Training. *Stud Health Technol Inform.* 2016;220: 215-8. (査読あり)

Tagawa K, Tanaka HT, Kurumi Y, Komori M, Morikawa S. Evaluation of Network-Based Minimally Invasive VR Surgery Simulator. *Stud Health Technol Inform.* 2016;220:403-6. (査読あり)

Vinh NQ, Tani T, Naka S, Yamada A, Murakami K. Thermal tissue change induced by a microwave surgical instrument in a rat hepatectomy model. *Am J Surg* 211(1):189-96.2016. (査読あり)

DOI: 10.1016/j.amjsurg.2015.07.008

Marutani T, Tanaka HT, Shimada N, Komori M, Kurumi Y, Morikawa S. Eye-hand coordination analysis according to surgical process in laparoscopic surgery training. *Smart Innovation, Systems and Technologies.* 45: 237-247, 2016. (査読あり)

DOI: 10.1007/978-3-319-23024-5_22

Murakami K, Naka S, Shiomi H, Akabori H, Kurumi Y, Morikawa S, Tani T. Initial experiences with MR image-guided laparoscopic microwave coagulation therapy for hepatic tumors. *Surg Today* (2015) 45:1173-1178. (査読あり)

DOI 10.1007/s00595-014-1042-x

Vinh NQ, Naka S, Cabral H, Murayama H, Kaida S, Kataoka K, Morikawa S, Tani T. MRI-detectable polymeric micelles incorporating platinum anticancer drugs enhance survival in an advanced hepatocellular carcinoma model. *Int J Nanomed* 10: 4137-4147, 2015. (査読あり)

DOI 10.0.8.99/IJN.S81339

Suzuki Y, Iida M, Miura I, Inubushi T, Morikawa S. A polymer-based magnetic resonance tracer for visualization of solid tumors by ¹³C spectroscopic imaging. *Plos One* 9(7): e102132, 2014.

(査読あり)

DOI: 10.1371/journal.pone.0102132
Yamaguchi S, Tsutsui K, Satake K, Morikawa S, Shirai Y, Tanaka HT. Dynamic analysis of a needle insertion for soft materials: Arbitrary Lagrangian - Eulerian-based three-dimensional finite element analysis. *Comput. Biol. Med.* 53: 42-47, 2014. (査読あり) doi:10.1016/j.combiomed.2014.07.012
Kato T, Tagawa k, Marutani K, Tanaka H, Komori M, Kurumi Y, Morikawa S. Evaluation of haptic teaching approaches for laparoscopic surgery training. *Stud Health Technol Inform* 196: 192-196, 2014. (査読あり)

[学会発表] (計 96 件)

Yamada A, Naka S, Tokuda J, Tani T, Morikawa S. An Accuracy Assessment of Hybrid Image Navigation System with MR and Ultrasound to Assist Needle Puncture. 31st International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2017), 2017 年 6 月 20-24 日バルセロナ

Yamada A, Naka S, Nitta N, Morikawa S, Tani S, Tani T. An Adaptive Steerable Needle based on a Loop-Shaped Flexible Arm. 31st International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2017), 2017 年 6 月 20-24 日バルセロナ

Yamada A, Naka S, Tokuda J, Tani T, Morikawa S. A Hybrid Image Navigation System with MR and Ultrasound to Assist Needle Puncture. 11th Interventional MRI Symposium. 2016 年 10 月 7-8 日 ポルチモア

Naka S, Yamada A, Tani S, Murakami K, Tokuda J, Hata N, Morikawa S, Tani T. MR Image Guided Surgical System with MR Compatible High Definition Flexible Endoscope -Initial Animal Study- 11th Interventional MRI Symposium. 2016 年 10 月 7-8 日 ポルチモア

Yamada A, Naka S, Morikawa S, Tani T. A Real-Time MR Image-Guided Surgical Navigation System for a MR-Compatible High Definition Flexible Endoscope. 12th Asian Conference on Computer Aided Surgery 2016 年 10 月 14-15 日 デジョン(大韓民国)

山田篤史, 仲成幸, 谷徹, 森川茂廣 MRI と超音波画像を併用した穿刺ナビゲーションシステムの有用性と精度評価

第 25 回日本コンピュータ外科学会大会
2016 年 11 月 26-27 日 東京

山田篤史, 仲成幸, 森川茂廣, 谷徹 高磁場対応軟性内視鏡を用いたリアルタイム MR 画像誘導ナビゲーションシステムの開発 第 25 回日本コンピュータ外科学会大会 2016 年 11 月 26-27 日 東京

Morikawa S, Yamada A, Naka S, Murakami K, Tani T, Tokuda J. A motorized manipulator with hybrid MR and US image navigation system to assist needle insertion. The 11th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS 2015) 2015 年 7 月 9-11 日シンガポール

森川茂廣, 山田篤史, 仲成幸, 村上耕一郎, 谷徹 .高磁場 MR 装置を用いた MR 画像・超音波画像併用穿刺支援ロボットシステム 第 15 回日本術中画像情報学会 2015 年 6 月 20 日 川崎市

森川茂廣, 仲成幸, 山田篤史, 谷徹 高磁場環境で動作する MR 画像と超音波画像を用いた穿刺支援ロボットシステムの開発 第 42 回日本磁気共鳴医学会大会 2014 年 9 月 18-20 日 京都

[その他]

ホームページ等

<http://mr-igaku.jp/>

http://bmicsurgery.shiga-med.ac.jp/homepage/index.php/Main_Page

6 . 研究組織

(1)研究代表者

森川 茂廣 (MORIKAWA, Shigehiro)
滋賀医科大学・神経難病研究センター・客員教授
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・非常勤講師
研究者番号 : 10359771

村上耕一郎 (MURAKAMI, Koichiro)
滋賀医科大学・医学部・非常勤講師
研究者番号 : 30572763

山田 篤史 (YAMADA, Atsushi)
滋賀医科大学・バイオメディカルイノベーションセンター・特任助教
研究者番号 : 30572763

(3)研究協力者

徳田 淳一 (TOKUDA, Junichi)