

リアルタイム MR イメージングと高磁場対応高解像度軟性内視鏡を組み合わせた
低侵襲ナビゲーションシステムの開発

Real-Time MRI-Guided Navigation System with MR Compatible
High Definition Flexible Endoscope

○ 山田篤史 (滋賀医科大学) 仲成幸 (滋賀医科大学) 森川茂廣 (滋賀医科大学)
谷徹 (滋賀医科大学)

Atsushi YAMADA, Shiga University of Medical Science
Shigeyuki NAKA, Shiga University of Medical Science
Shigehiro MORIKAWA, Shiga University of Medical Science
Tohru TANI, Shiga University of Medical Science

Abstract: In the present study, we developed a real-time MRI-guided navigation system with MR compatible high definition flexible endoscope for 3T closed bore MRI to perform minimally invasive surgery. The MR compatible endoscope had a CMOS image sensor at the tip of the endoscope to produce high definition images with 720×720 pixels which was about 295 times higher than the image resolution of the fiberscope type MR compatible endoscope we had developed. The MRI sequence used in this system produced real-time images with the minimum 0.8 sec/plane. The feasibility of the navigation system was assessed by phantom studies for evaluating the resolution of the camera and animal studies by observing the liver of a mini pig with the real-time MR images and the endoscope images simultaneously to evaluate these image qualities.

Key Words: Real-time MR Imaging, MR Compatible Flexible Endoscope, Navigation System

1. はじめに

我々は、診断-治療-評価をシームレスにおこなうための方法として、体内や実質臓器に挿入した機器周辺において、1) 腫瘍、血管などを含めた軟性組織の変形; 2) 熱アブレーションによる焼灼範囲などの治療効果の時間変化; を、随時更新される断層画像にて確認・評価することで、安全で確実な低侵襲治療を実現するリアルタイム MR 画像誘導手術を提唱してきた。そして、その実現可能性を評価するために、リアルタイム MRI ナビゲーションシステムを構築し、約 2 秒/枚の速度で撮像可能なオープンボアの 0.5 T ダブルドーナツ型 MRI スキャナ (Signa SP/2, GE Healthcare, Waukesha, WI, USA) と針型のマイクロ波焼灼プローブを用いたリアルタイム MR 画像誘導下マイクロ波穿刺焼灼治療法を開発^{(1) (2) (3)}し、臨床応用をおこなってきた。また、高磁場対応の穿刺補助ロボットを開発し、上記治療法と組み合わせることで、肝腫瘍に対して 200 以上の症例を施行することに成功した⁽⁴⁾。さらに、このシステムを広く診断に使用されているクローズドボアの MRI スキャナに対応させるため、高磁場対応ファイバースコープ型内視鏡⁽⁵⁾を新たに開発した。また、スキャナの傾斜磁場を利用した位置センサ⁽⁶⁾およびリアルタイム MR 断層画像を利用して内視鏡をナビゲーションする画像誘導装置^{(7) (8) (9) (10) (11) (6) (12)}の開発をおこない、クローズドボアの 1.5T MRI スキャナ (SIGNA Excite, GE Healthcare, Waukesha, WI, USA) を用いた NOTES 手技をおこなうシステムを開発してきた。しかし、高磁場対応軟性内視鏡はファイバースコープである為に、カメラが低解像度 (1660 画素) であった。また、リアルタイム MRI の撮像速度 (2 秒以下で 1 枚撮像) が臨床応用を想定した場合には不十分であった。そこで本稿では、臨床応用可能な性能を有するシステムとして、より高解像度の高磁場対応高解像度 (HD: High Definition) 軟性内視鏡および高磁場 MRI スキャナを用いた画像誘導システムを構築し、動物実験によりその実現可能性を定性的に評価した。

2. 提案システム構成要素および実験材料

2.1 MRI スキャナ

クローズドボアの 3T MRI スキャナ (Magnetom Verio 3T, VD13A software, SIEMENS Healthcare, Erlangen, Germany) を用いた。ガントリ長は 173 cm, ボア直径は 70 cm である。

2.2 高磁場対応高解像度軟性内視鏡

高磁場対応の HD 軟性内視鏡を開発した。試作機を Fig.1 に示す。挿入部先端外径 11 mm, 有効長 1200 mm, 先端湾曲性能: 上方向 120 度, 下方向 100 度, 左右方向 100 度ずつとして設計した。鉗子チャンネルは 2 mm 用を 2 ポート, 2.5 mm 用を 2 ポート搭載した。ライトガイドおよびカメラユニット固定機能、将来のロボット化を見越してマニピュレータ接続構造を採用した。筐体は、高磁場対応金属素線にてシールドした。内視鏡カメラとして、画素数 400×400 (超解像度技術により解像度 720×720 相当) の CMOS イメージセンサを採用した。イメージセンサは高磁場に対応するためにシールドされた直径 2.10 mm のレンズ付きシースに搭載され、シースは内視鏡先端に固定した。カメラ視野角は 100 度以上、焦点深度は 5 mm-50 mm, フレームレートは 30 fps である。ライトガイドの光源は RX-3300 (株式会社町田製作所, 千葉) を用いた。

2.3 磁気トラッキングシステム

内視鏡先端の位置および姿勢を得るために、MRI スキャナの傾斜磁場に基づくトラッキングシステム (EndoScout II, RobinMedical Inc., Baltimore, MD, USA) を用いた。センサは、直径 2.0 mm のカテーテルタイプを用いた。センサは、高磁場対応 HD 内視鏡の 2.5 mm 用ポートに挿入した。

2.4 高磁場対応ディスプレイ

MRI スキャナ付近で内視鏡画像を確認しながら高磁場対応 HD 軟性内視鏡を操作するために、高磁場対応ディスプレイを制

作した。ディスプレイは画素数 1920×1080 の 3D 対応 32 インチ液晶パネル 2 面で構成した。ディスプレイ信号は、変換器を用いて HDMI ケーブルから光ファイバケーブルに変換され、ペネトレーションパネルを介して MRI 室から操作室に配線された。光ファイバケーブルを経由したディスプレイ信号は、再び HDMI ケーブルに変換され、ワークステーションに接続した信号コンバータ (DVI2USB 3.0, Epiphan Systems, Ottawa, Canada) にてキャプチャされた。ディスプレイは、ペネトレーションパネルおよびノイズフィルタを介して操作室の電源装置に接続された。

2.5 ナビゲーションソフトウェア

フリー・オープンソースソフトウェアの 3D Slicer⁽¹³⁾ Version 4.4 をベースに、ナビゲーションソフトウェアを開発した。ソフトウェアは、OpenCV ベースのカメラ画像ビューワモジュール (EndoscopeConsole)、ステータス表示モジュール (CornerAnnotation) および機能切替モジュール (WorkflowOrganizer) をそれぞれ開発して構成した。リアルタイム MRI 撮像シーケンスとして、SIEMENS の Work In Progress (WIP) である BEAT-IRTTT を用いた。撮像速度が 0.8 秒/枚および 1.2 秒/枚となるようにシーケンスパラメータを設定した。撮像した MRI 画像は OpenIGTLink⁽¹⁴⁾ を用いて 3D Slicer に転送した。ナビゲーションソフトウェアは、OS X Yosemite 10.10.5 オペレーティングシステム搭載のワークステーション (Mac Pro, 3 GHz 8-core Intel Xeon E5 プロセッサ, 64GB 1866 MHz DDR3 ECC 付 RAM, AMD FirePro D700 6144 MB; Apple Inc., Cupertino, CA, USA) にて稼動した。

2.6 実験用動物

本実験は当大学動物実験委員会および動物生命科学研究倫理委員会にて承認された。実験用動物として、ミニブタ (*Sus scrofa domestica*, 約 32 Kg, メス) を用いた。ミニブタは、人工呼吸器および動物用麻酔器 (Compos X および Compos β , 株式会社メトラン, 埼玉) を用いて、イソフルラン 0.5-5% を用いた吸入麻酔が施された。

3. 実験

実験は、内視鏡カメラ特性評価実験 (ファントム実験) およびリアルタイム MRI 画像および内視鏡カメラ画像の特性評価実験 (動物実験) の 2 種類を施行した。はじめに、ファントム実験をおこなった。この実験では、我々がこれまでに開発したファイバースコープ型の高磁場対応軟性内視鏡と、本稿で開発した CMOS 搭載型高磁場対応 HD 軟性内視鏡のカメラ映像の画質を MRI 室外にて比較した。被撮影画像ファントムとして、カラーマップおよびサイズ 0.5 mm の文字を複数印刷したキャリブレーション用プレートを用意した。次に、動物実験をおこなった。ミニブタには、当大学動物手術室にて吸入麻酔が施行された後にトロッカが挿入された。その後、動物手術室から MRI 室に移動し、トロッカを経由して高磁場対応 HD 軟性内視鏡をミニブタの肝臓付近まで挿入した。その状態でリアルタイム MRI 撮像を開始し、操作者が MRI 室内に設置した高磁場対応ディスプレイで内視鏡カメラ画像を確認しながら、内視鏡を操作した。操作中のナビゲーションソフトのユーザインタフェースを録画した。操作中の内視鏡画像および MRI 画像のクオリティおよびシステムの安定性を比較した。手技は当大学および付属病院所属の外科医 (S.N, P.M.N, D.T.K) によりおこなわれた。

4. 結果および考察

ファントムの比較画像を Fig.2 に示す。従来のファイバースコープ型カメラ画像ではファントムに印刷された文字を読むことなどできないが、試作した HD 軟性内視鏡のカメラ画像では、は

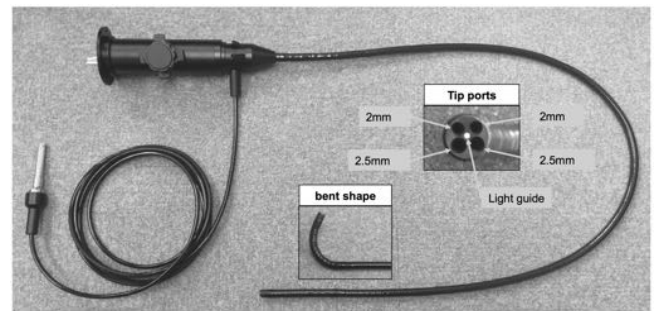


Fig.1 MR compatible high definition flexible endoscope. There are four ports at the tip of the endoscope. The two of them has 2.5 mm inner diameter and the others has 2.0 mm inner diameter. The light guide is at the center of the tip face. The base of the endoscope has an interface to connect to robot manipulators.

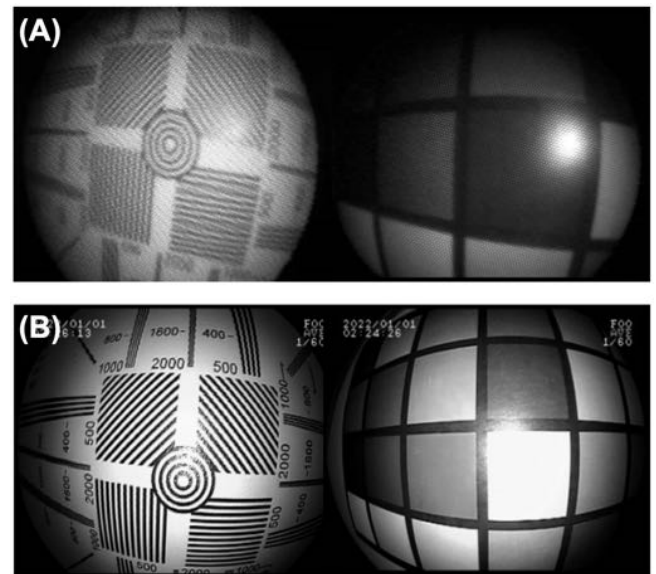


Fig.2 Result of phantom experiment. Camera images of conventional fiberscope type MR compatible endoscope(A) and camera images of MR compatible high definition MR compatible endoscope (B). The left images show geometrical patterns with 0.5mm characters and the right images show color maps.

きりと 0.5 mm サイズの文字を判別可能であった。また、カラーマップの色味に関しても問題なく表示された。試作機の解像度 (700×700 画素) は、ファイバースコープ型の解像度 (1660 画素) の約 295 倍であった。録画したコンソール画像を Fig.3 に示す。コンソール上に提示されたリアルタイム MRI 画像の各断面は、ノイズが少なく臓器および周辺組織の判別も十分に可能であった。内視鏡画像はノイズがほとんどなく、MRI 室外で確認したカメラ画像の画質との違いは認められなかった。また、リアルタイム MRI 画像はシーケンスパラメータの設定により、0.8 秒/枚および 1.2 秒/枚で安定して撮影が可能であった。そのため、従来のシステムと比較して十分滑らかに臓器の変形を捉えることができた。

5. まとめ

本稿では、1.5T MRI スキャナをベースに構築したリアルタイム MR 画像誘導下内視鏡システムを拡張し、3T MRI スキャナをベースに高磁場対応 HD 軟性内視鏡システムを用いた手術ナビゲーションシステムを構築した。外科医が内視鏡画像でブタの

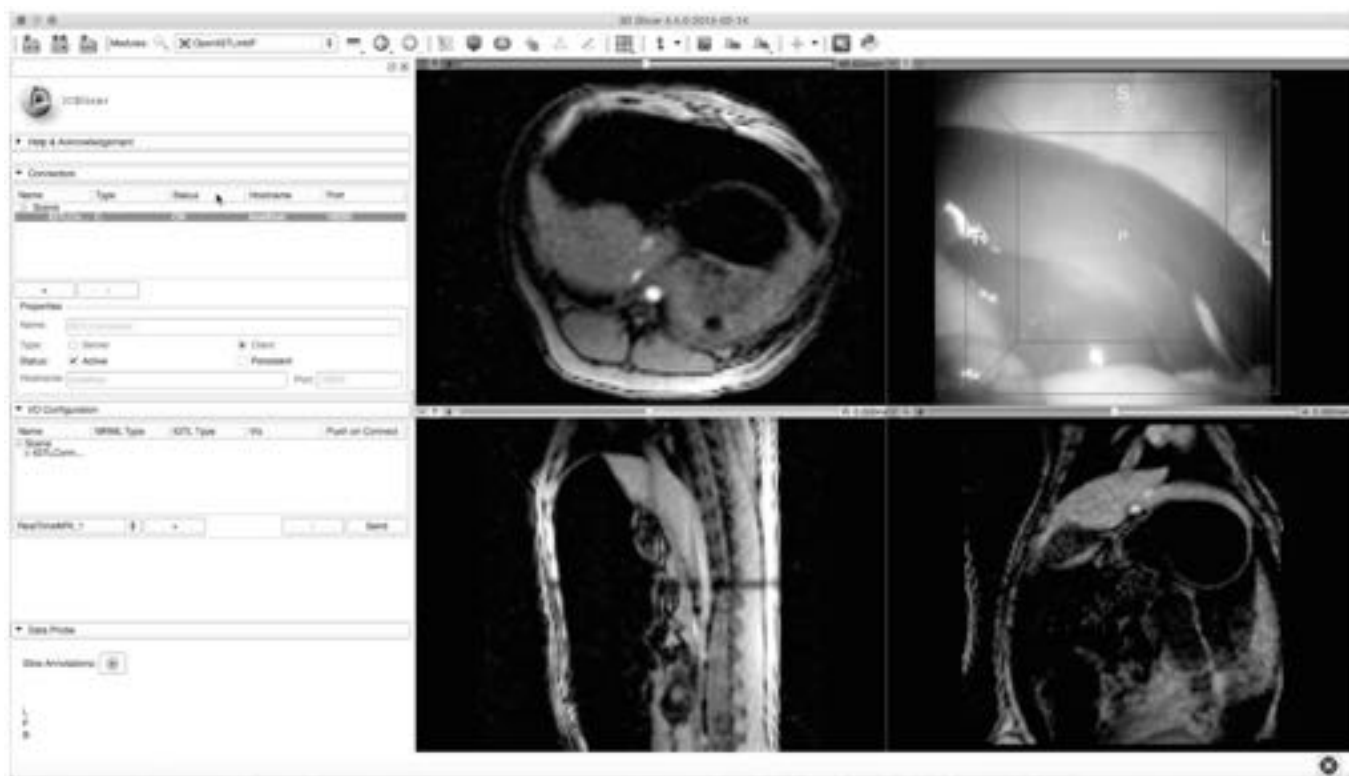


Fig.3 Userinterface of the navigation system developed for real-time MRI guided system. The navigation system was based on 3D Slicer⁽¹³⁾. The upper right pane shows endoscope camera image displaying a liver of a mini pig. The other three panes show axial, coronal and sagittal planes of abdominal MR images obtained by real-time scanning.

肝臓を確認し、リアルタイム MRI 画像で臓器の変形を把握可能であることを確認した。これにより、システムの各要素は、これまでに構築した試作機の性能をはるかに凌駕し、臨床応用を見越した質を維持しているため、実現可能性は現実味を帯びてきていると考えている。本稿では実行可能性を評価する基礎実験として定性的な評価にとどめているので、定量的な評価をおこなう予定である。また、本実験では磁気トラッキングシステムを作動させなかったが、磁気トラッキングシステムを用いて内視鏡先端の位置・姿勢を検出するための撮像シーケンスを開発中である。

著者らはこれまでに、1.7 Fr. (外径 0.58mm) のアクティブカテーテル⁽¹⁷⁾を実現するほどスケールリングが可能なユニークな機構を用いて屈曲角度をコントロール可能な高磁場対応の操舵可能な針⁽¹⁵⁾を開発している。また、マイクロ波をエネルギー源とした外科的治療機器の開発も継続している⁽¹⁶⁾。これらを高磁場対応 HD 軟性内視鏡のポートを介した治療用機器として統合利用することで、医師が安全に低侵襲治療をおこなうための統合治療システムの構築を目指す。

本研究は JSPS 科研費 (16K18050) および立石財団研究助成金 (研究助成 A, 2161026) の一部助成を受けた。また、動物実験では、Pham Minh Ngoc 先生および Dang Tran Khiem 先生のサポートを受けた。ここに感謝の意を示す。

参考文献

- (1) Naka Shigeyuki, Kurumi Yoshimasa, Murakami Koichiro, Shiomi Hisanori, Hasnine A Haque, Morikawa Shigehiro, Tani Tohru: MR gradient-based tracking system for MR-guided Microwave Ablation of Liver Tumor, *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 3(Suppl) : S376, 2008.
- (2) Shiomi Hisanori, Naka Shigeyuki, Sato Koichiro, Demura Koichi, Murakami Koichiro, Shimizu Tomoharu,

Morikawa Shigehiro, Kurumi Yoshimasa, Tani Tohru : Thoracoscopy-assisted magnetic resonance guided microwave coagulation therapy for hepatic tumors, *The American Journal of Surgery*, 195(6) : 854-860, 2008.

- (3) Shigehiro Morikawa, Shigeyuki Naka, Hiroyuki Murayama, Yoshimasa Kurumi, Tohru Tani and Hasnine A. Haque: MRI-Guided Microwave Ablation, *Interventional Magnetic Resonance Imaging*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.
- (4) Hata, N., J. Tokuda, S. Hurwitz, S. Morikawa: MRI-Compatible Manipulator for Ablation Therapy for Liver Tumors using Synergistic Virtual Remote-Center-of-Motion Control, *J Magn Reson Imaging* 27:1130-1138, 2008.
- (5) Naka Shigeyuki, Kurumi Yoshimasa, Sato Koichiro, Murakami Koichiro, Shiomi Hisanori, Hasnine A Haque, Morikawa Shigehiro, Tani Tohru: MR-compatible flexible endoscope for Natural Orifice Translumenal Endoscopic Surgery (NOTES), *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 4(Suppl):S242-S243, 2009.
- (6) H. Murayama, S. Naka, K. Murakami, K. Sato, H. Shiomi, H. Haque, Y. Kurumi, S. Morikawa, T. Tani: Development of MR tracking system for the MR image guided endoscopic surgery, *Int J CARS*, 2011.
- (7) Naka Shigeyuki, Tani Tohru Murayama Hiroyuki, Hasnine A Haque, Morikawa Shigehiro, Kurumi Yoshimasa, : MR-image guided surgical system for endoscopic surgery, *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 7(Suppl):S231-S232, 2012.
- (8) S. Naka, T. Tani, H. Murayama, H. Haque, S. Morikawa, Y. Kurumi: MR-image guided surgical sys-

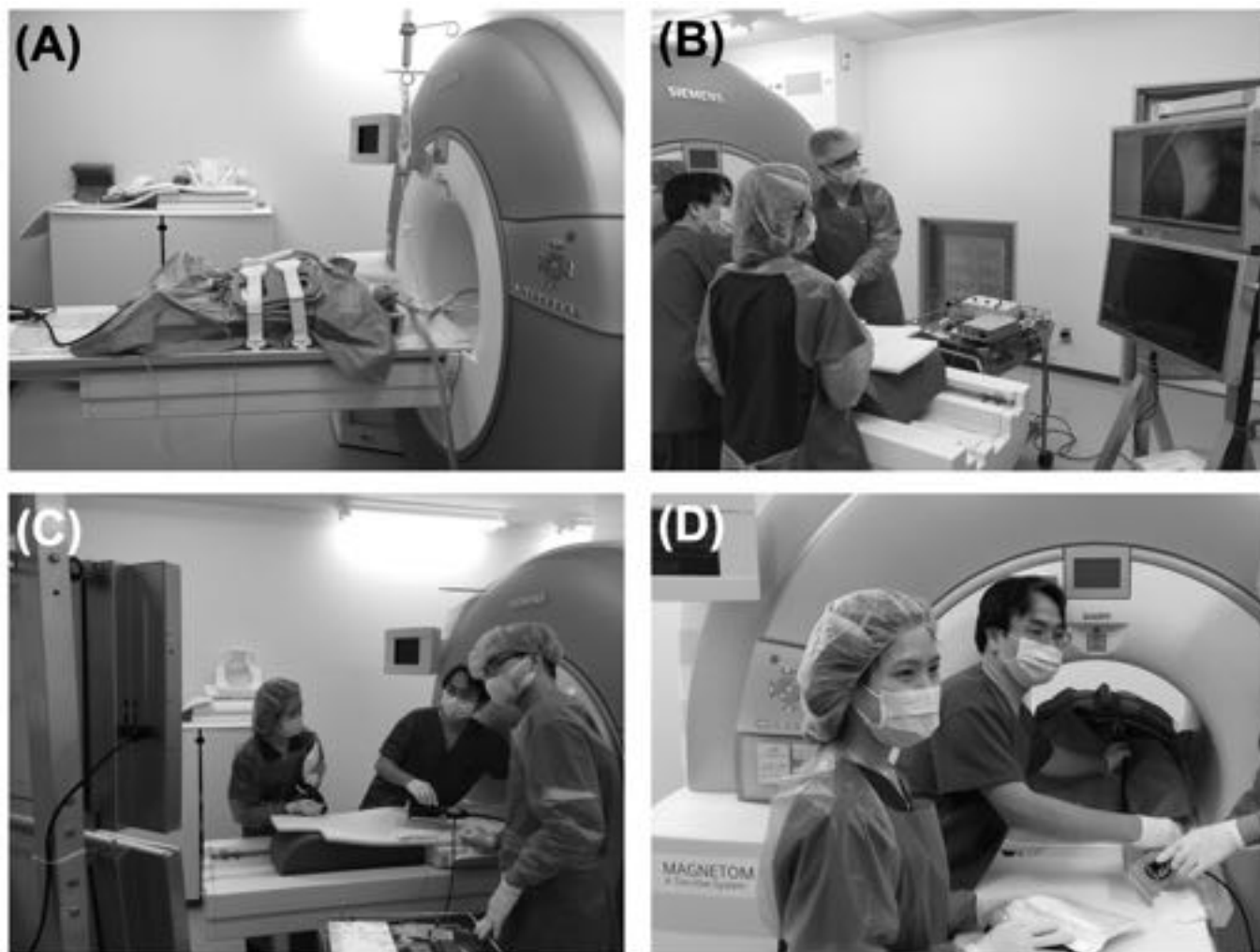


Fig.4 Experimental scenes. (A) Pig on MRI bed (B)(C) Operations of MR-compatible high definition flexible endoscope using the MR compatible in-room monitors (D) Operation of MR-compatible high definition flexible endoscope inserting through the trocar and controlling the tip angle of the endoscope.

tem for endoscopic surgery, *Int J CARS*, 2012.

- (9) Hasnine A Haque, Shigehiro Morikawa, Shigeyuki Naka, Yoshimasa Kurumi, Hiroyuki Murayama, Tohru Tani, Tetsuji Tsukamoto: Simultaneous Endoscopy and MRI Acquisition, *Interventional Magnetic Resonance Imaging*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.
- (10) H. Haque, S. Morikawa, S. Naka, Y. Kurumi, H. Murayama, T. Tani, T. Tetsuji: Augmented reality based MR image guided navigation system for flexible endoscope, 8th *Interventional MRI Symposium*, 2010.
- (11) S. Naka, H. Murayama, K. Murakami, K. Sato, H. Shiomi, H. Haque, Y. Kurumi, S. Morikawa, T. Tani: MR image guided NOTES (Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery) system, *Int J CARS*, 2011.
- (12) Hasnine Haque, Shigehiro Morikawa, Shigeyuki Naka, Hiroyuki Murayama, Tohru Tani, Tetsuji Tsukamoto, Intraoperative MR image Guided Endoscopic Surgery on a Closed Bore MR Scanner, *Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med.*, 20, 2012.
- (13) 3D Slicer: www.slicer.org
- (14) Tokuda J, Fischer GS, Papademetris X, Yaniv Z, Ibanez L, Cheng P, Liu H, Blevins J, Arata J, Golby AJ, Kapur T, Pieper S, Burdette EC, Fichtinger G, Tempny CM,

Hata N. OpenIGTLink: an open network protocol for image-guided therapy environment. *Int J Med Robot.* 2009 Dec;5(4):423-34.

- (15) Yamada, A., S. Naka, S. Morikawa, and T. Tani: MR Compatible Continuum Robot Based on Closed Elastica with Bending and Twisting, *The 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2014)*, 3187-3192, Chicago, Illinois, 9/14-18, 2014.
- (16) Nguyen Quoc Vinh, Tohru Tani, Shigeyuki Naka, Atsushi Yamada, Koichiro Murakami: Thermal Tissue Change Induced by a Microwave Surgical Instrument In a Rat Hepatectomy Model, *American Journal of Surgery*, 211:189-196, 2016.
- (17) 山田篤史, 新田哲久, 仲成幸, 森川茂廣, 谷徹: Active Sheathを用いた 1.7Fr 能動マイクロカテーテルの開発, 第 24 回日本コンピュータ外科学会大会, 東京大学, 11/21-23, *J JSCAS vol.17 no3* 225-226, 2015.