

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500547

研究課題名(和文)消化管内 phased array コイルによる高分解能MR撮像とプロトンMRS

研究課題名(英文)High resolution MR imaging and ¹H MRS for gastrointestinal tract by intraluminal phased array coil

研究代表者

松岡 雄一郎 (Matsuoka, Yuichiro)

独立行政法人情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター脳機能計測研究室・主任研究員

研究者番号：80372150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：MRIと消化器内視鏡を融合したMR内視鏡システムの研究を進めており、本研究では消化管の内側からMR信号を検出するアンテナ(RFコイルと呼ぶ)を複数で構成することを目指した。同時に、MR内視鏡システムを構成するナビゲーション機能の改良を行い、摘出した動物の胃を用いた実験で、MR撮像の位置設定に要する時間の短縮を可能にした。さらに単一RFコイルを用いて動物の胃潰瘍モデルのMR撮像を試み、1.5T-MRI装置において高画質なMR画像取得を実現した。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this study is to establish an MR-endoscope system by integrating an endoscope on MRI to improve an accuracy of endoscopy and endoscopic surgeries by providing high quality MR images. In order to produce the high quality MR images, we aimed at developing a phased array antenna to detect an MR signal from inside the gastrointestinal tract. In addition, the navigation function for MR-endoscope system was improved to simplify an MR imaging set-up and display a target region for MR imaging on 3D view based on multi-slice MR images of stomach. The set-up time for MR imaging was shortened up to 40 seconds with animal experiment in vitro. And also, the MR imaging of gastric ulcer model using a single channel antenna at 1.5T MR scanner was examined with pigs, then the gastric ulcer region was visualized with high spatial resolution.

研究分野：MRI, 生体医工学

キーワード：医用システム RFコイル 低侵襲治療システム 内視鏡 MRI

1. 研究開始当初の背景

新しい内視鏡機器の開発により、消化器癌に対する高度な内視鏡検査と治療が可能となってきたが、高度な手技と熟練が求められる。内視鏡的診断や治療の安全性、信頼性を格段に向上させる機器や技術開発が必要であり、通常の内視鏡のみでは困難な消化管組織内部を可視化する技術として、Optical Coherence Tomography (OCT) や超音波内視鏡などが開発されている。しかしながら、粘膜表面から浅い領域の病変診断に限られる、あるいは、軟部組織のコントラストが不十分で、かつ画質が術者の手腕に依存するなどの欠点がある。そこで、放射線被曝の無い磁気共鳴画像 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) と内視鏡を融合させた MR 内視鏡システムの研究開発を進めている。MR 画像の画質は、信号雑音比 (Signal to Noise Ratio: SNR) や空間分解能が指標となるが、高い SNR の MR 画像を得るには MR 撮像する組織から MR 信号を検出するセンサ (Radio-Frequency (RF) コイル) の性能や RF コイルと組織との距離が重要となり、例えば、MR 撮像する組織と RF コイルとの距離が近いほど SNR が高くなり、同じ SNR を維持するなら空間分解能を高められる。一般的な腹部 MR 撮像では、体外に RF コイルを設置するため体深部に存在し、かつ壁の薄い食道や胃などを高空間分解能、高 SNR で描出することは困難である。そのため、MR 内視鏡システムの研究開発では、内視鏡による消化管の表面観察に加えて、消化管内部に留置する RF コイルで消化管を MR 撮像し、消化管壁の層構造、癌の深達度、周辺血管の分布などを可視化する技術開発、システム構築と実用化を目指している。

本研究課題開始までに、軟性および硬性の内視鏡と MRI とを融合したプロトタイプシステムを構築し、消化管内部から MR 撮像するだけでなく、MR 画像を正確な断層位置で内視鏡写真に重畳表示するためのソフトウェアプロトタイプの構築と、MRI 装置内における内視鏡先端の位置と姿勢を追尾するシステムを備えた。また、1.5T-MRI 装置において健全な子ブタを使用した動物実験で、正常な胃壁を面内分解能 156 μ m で MR 撮像し、内視鏡と MR 画像の融合提示も実現している。その一方で、体内での RF コイルの共振特性変化を改善する技術開発の必要性が、動物実験で明らかとなった。

一方、類似研究としては 1990 年初め頃から日本、イギリス、アメリカ、ドイツのグループから報告があり、2000 年以降では MR 対応内視鏡に搭載した RF コイルによる食道の MR 撮像や、柔軟な構造の RF コイルを胃に挿入して MR 撮像する案が報告されている。これらの類似研究では、単一 RF コイルによる消化管内部からの MR 撮像に限定されており、内視鏡先端の位置・姿勢の検出から内視鏡写真と MR 画像を重畳表示するなど本研究

が取り組んでいる統合的な MR 内視鏡システムとは異なる。

2. 研究の目的

従来の単一 RF コイルによる消化管内部からの MR 撮像に限らず、撮像範囲の拡大と SNR の向上を図るため複数の RF コイルを組み合わせた phased array コイルの開発、体内での RF コイルの共振特性を遠隔調整する機能の開発を目的とした。加えて、内視鏡で観察する部位を効率的かつ確実に MR 撮像するための機能開発も重点的に行った。胃腔内に設置した RF コイルの形状や場所は内視鏡で視認可能であるが、MR 撮像するためには胃腔内の RF コイルの位置や姿勢を MRI 座標系で把握し、それに基づいて MR 撮像範囲を設定する必要がある。従来は RF コイルに MR 信号を呈するマーカーを取り付け、体外 RF コイルで胃全体を MR 撮像して MR 画像上のマーカー信号を調べることで、胃腔内の RF コイルのおおよその場所を判断していた。この手法では胃腔内に設置した RF コイルで MR 撮像するための設定を完了するまでに時間を要するため、短時間で適切に MR 撮像範囲を決定するための技術、手法の開発である。なお、当該研究では、MRI 装置として 1.5T-MRI を用いた。

3. 研究の方法

(1) phased array コイル

1.5T-MRI 装置で水素原子核を観測する受信専用 RF コイルを 2 チャンネル構成で設計した。各コイルは直径 0.5mm の銅線を用いて平面型の 1 巻 (30 \times 35mm) とし、1.5T-MRI における水素原子核の共振周波数 63.9MHz に同調し、かつ受信信号を効率よく MRI 装置へ伝送するため 50 Ω に整合した。Phased array 構造とする際、隣接するコイル間の磁気結合をなくすデカップリングは、隣接するコイルが重なる領域を調整するオーバーラップ法を適用した。なお、同調・整合およびデカップリング調整時は、RF コイルが胃腔内にあることを模擬するため、RF コイル近傍に成人ヒトの前腕を近接してネットワーク・アナライザで反射特性 (S11) を計測して調整を行った。

(2) MR 撮像範囲の検出

MRI 装置の勾配磁場を利用して位置と姿勢を検出する勾配磁場センサ (直径約 2mm、長さ約 15mm) を利用した。勾配磁場センサを MR 対応内視鏡先端に取り付け (図 1)、胃腔内に設置した RF コイル形状を内視鏡で観察すると同時に、内視鏡先端を RF コイル面上の異なる 3 ヲ所に近づけて 3 ヲ所の座標を計測した。得られた 3 ヲ所の座標から構成される平面 (三角形) の重心座標を算出し、その座標を中心に MR 撮像する範囲を設定した。3 点の座標計測、重心座標算出のためのプログラムを開発して、MR 内視鏡システム用の

ナビゲーションソフトウェアに組み込んだ。ナビゲーションでは胃全体構造に対して検出した各座標やコイル位置などを表示できるように、体外 RF コイルで広範囲の胃を多断面撮像して得られたボリュームデータを利用した Multi-planar Reconstruction (MPR) 画像 (a) の表示、内視鏡先端から任意の位置における直交断面 MR 画像 (b) の表示、MR ボリュームデータから構築したボリュームレンダリング 3 次元画像と (a) および (b) の画像への内視鏡の位置・姿勢情報の組み込み、さらに内視鏡映像を表示するため、ソフトウェアの改良を行った。機能検証として、摘出した動物(子ブタ)胃および生体動物(子ブタ)を用いて実験を行った。なお、ナビゲーションソフトウェアは勾配磁場センサのデータを TCP/IP 通信により 63ms の応答速度で取得した。



図 1. MR 対応内視鏡先端に搭載した勾配磁場センサ

一方、MRI シールド室内で、体内の MR 対応内視鏡と胃腔内の RF コイルの位置と姿勢、および撮像された MR 画像の相対的な位置関係を表示するナビゲーションを操作可能とするために、加速度センサを搭載した市販のワイヤレスコントローラをナビゲーションソフトウェアに組み込んだ。このコントローラとナビゲーションとの通信に Bluetooth を用いるため、この通信による MR 画像および勾配磁場センサの検出精度への影響を、ファントムを用いた MR 撮像実験により調べた。MR 画像への影響は、ワイヤレスコントローラを MR 装置のマグネットの近傍 (c1)、マグネットから離れた MRI シールド室の壁付近 (c2) および MRI シールド室外 (c3) でそれぞれ操作して、その時にヘッドコイルを用いて硫酸銅水溶液から構成される球形ファントムを Spoiled GRASS (SPGR) 法、Spin Echo (SE) 法、Fast Spin Echo (FSE) 法の 3 つの撮像方法で画像取得し、MR 画像の SNR を調べて評価した。また、勾配磁場センサへの影響は、c1 ~ c3 の位置でワイヤレスコントローラを操作中に、同じ球形ファントム外周に取り付けた 3 つの勾配磁場センサで位置・姿勢情報をそれぞれ 200 点検出して、その平均値を計算して評価した。

(3) 動物胃潰瘍モデルの高空間分解能 MR 撮像

ナビゲーション機能を活用して、胃潰瘍モデルの高空間分解能 MR 撮像を試みた。MR 撮像には phased array コイルではなく受信専用の単一 RF コイルを用いた。RF コイルは、銅配線 (厚さ 0.035mm、幅 2mm) による 2 巻でサイズは 40 × 50mm の平面型で、かつ柔軟性を備える (図 2)。RF コイルの共振周波数とインピーダンスは、コイル周囲の組織の電気特性の影響を受けて変化するため、体内に入れると共振特性が変化するという問題がある。そこで、経験的に胃腔内に設置した場合の共振特性変化量を考慮して、RF コイルの共振特性を調整した。また、胃潰瘍モデルは健康な動物に対して内視鏡的手技を用いて、胃粘膜下層に生理食塩水を注入して肥大化したうえで、胃粘膜と粘膜下層を剥離して 3 カ所作成した。

まず、体外 RF コイル (ボディコイル) で胃全体を含むように広範囲の MR 撮像を行い、ボリュームデータを取得した。ナビゲーションソフトウェアでボリュームレンダリング処理をして 3 次元表示し、勾配磁場センサを取り付けた MR 対応内視鏡を経口的に胃腔内に挿入して、各潰瘍モデルに内視鏡先端を近づけて保持し、その点の座標を計測した後、3 つの潰瘍座標から形成される三角形の重心座標を計算して腔内 RF コイルで MR 撮像する範囲を決定し、同時に 3 次元画像上に計測された 3 つの潰瘍と重心の位置を表示した。その後、MR 対応内視鏡を胃から取り出し、MRI シールド室外で一般の消化管内視鏡を用いて腔内 RF コイルを胃腔内に挿入し、潰瘍の一つを覆うようにコイル面形状が極力平面になるように配置した。腔内 RF コイルを残したまま内視鏡を取り出し、MR 装置に動物を入れ、事前に決定された MR 撮像範囲において FSE 法で T1 および T2 強調画像を撮像した。

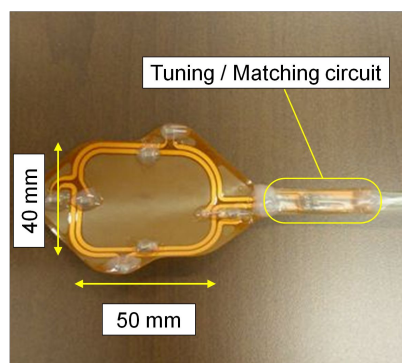


図 2. 単一チャンネル腔内 RF コイル

4. 研究成果

(1) 2 チャンネル phased array コイルの共振特性

隣接する 2 つのコイルが重なり合う領域を調整してデカップリングを行い、成人ヒトの前腕を負荷とした (phased array コイルを前腕に近接した) 場合の 2 つのコイルの共振特性は、共振周波数 (f)、インピーダンス (Z)

Q 値がそれぞれ $f = 63.865\text{MHz}$, $Z = 50.7\Omega$, $Q = 96$, および $f = 63.865\text{MHz}$, $Z = 54.6\Omega$, $Q = 104$ であった。またリターン・ロスおよび定在波比 (SWR) はそれぞれ、 -35dB と 1.04 , および、 -27dB と 1.09 であった。試作した phased array コイルのサイズは約 $30 \times 60\text{mm}$ のため、実用にはコイルエレメントおよび絶縁材を薄膜化して柔軟性を高めると同時に、同調・整合回路を含めて更なる小型化が必要であるものの、デカップリングおよび共振特性の最適化は達成し得た。

(2) ナビゲーションによる MR 撮像範囲の検出

摘出したブタ胃の実験では、腔内 RF コイル上の 3 カ所の MR 座標計測から MR 撮像範囲の設定まで、約 40 秒を要した。従来の手法では数分要していたため、本手法により大幅に時間短縮できることを示せた。また計測した 3 カ所の座標、それらの座標から計算された重心座標は、ナビゲーションソフトウェアにより胃の広範囲のボリュームデータから構築された 3 次元画像に対して表示され、同時に MR 対応内視鏡の位置・姿勢も表示し得た (図 3)。このように表示された画像は、勾配磁場センサによる位置情報検出と同期して、リアルタイムで表示できた。しかしながら、生体動物 (子ブタ) 実験では、MR 対応内視鏡のサイズが太く (外径約 17mm)、腔内 RF コイル、勾配磁場センサなどと同時に経口的に胃に挿入して操作することが困難であったため、本手法の検証には至らなかった。

一方、ワイヤレスコントローラの使用による MR 画像と勾配磁場センサの検出精度への影響については、ワイヤレスコントローラの操作場所 c3 に対する c1 および c2 での MR 画像の有意な画質低下が認められなかったが、勾配磁場センサの検出座標は 2 点で 0.2mm 以下の差異、1 点で 0.9mm 以下の差異が認められた。しかしながら、腔内 RF コイルによる MR 撮像断面の厚さを $2 \sim 5\text{mm}$ 程度とする場合においては、位置・姿勢検出、および撮像範囲設定に対して大きな影響を与えるものではないと判断した。

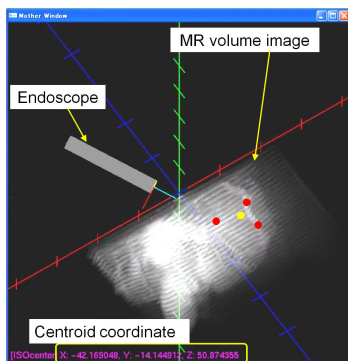


図 3. 腔内 RF コイル上の 3 点 (赤色) と重心座標 (黄色) および内視鏡先端位置・姿勢を示すナビゲーション画像

(3) 動物胃潰瘍モデルの実験結果

作成した胃潰瘍モデルの大きさは、それぞれ直径が約 15mm 程度であった。図 4 に示すように、ナビゲーションソフトウェアにより胃全体の MR ボリュームデータから構成された 3 次元画像上に 3 カ所の胃潰瘍の場所と、それにより計算された重心位置を表示でき、かつ内視鏡位置・姿勢もリアルタイムで表示し得た。これらの情報から決定した MR 撮像範囲を腔内 RF コイルで撮像した結果、図 5 の画像を得た。なお、胃腔内に設置した腔内 RF コイルの共振周波数は約 64.75MHz 、インピーダンスは約 35.2Ω であった。事前に予測した通りの共振特性変化とはならず、最適な共振特性にはならなかったが、正常な胃壁の 3 層構造と粘膜と粘膜下層が欠落した胃潰瘍部位を高空間分解能 ($0.313 \times 0.5 \times 3.0\text{mm}^3$) で描出し得た。

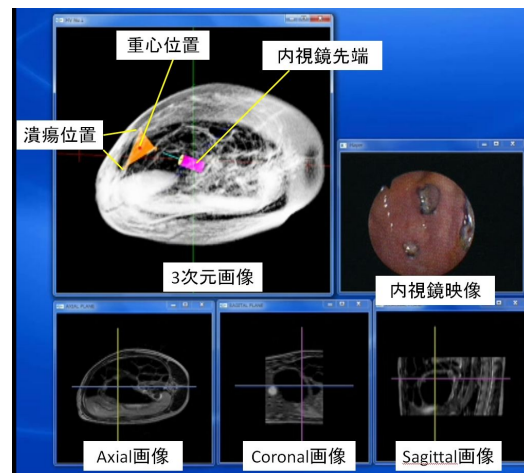


図 4. 動物胃潰瘍モデル実験におけるナビゲーション画像

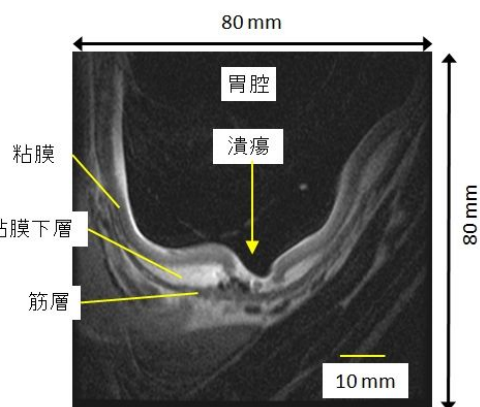


図 5. 胃潰瘍部位の T2 強調画像

(4) 今後の展望

経口的に胃腔内へ挿入可能なサイズの腔内 phased array コイルの構築には、生体安全性も考慮して電磁界解析による構造や配置の最適化に加えて、コイルエレメントや回路構成素子の小型化、さらには胃腔内に設置した時のコイル間のデカップリング調整な

ど、対策が必要である。また、MR 内視鏡システムにおけるナビゲーション機能はほぼ完成しつつあるが、腔内 RF コイルの共振特性の遠隔調整機能の確立が必要である。この機能確立により MR 画像の更なる画質向上が期待できるため、当該機能の研究開発を進める予定である。これらの機能を搭載した MR 内視鏡システムにより、より正確な胃病変診断が期待でき、内視鏡検査や治療の安全性向上に寄与しえると考える。一方、MR 対応内視鏡の細径化も課題であり、企業との共同研究や、新規研究予算の獲得などでこの問題解決に取り組み、当該システムの実用化を目指す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 11 件)

Yuichiro Matsuoka, Yoshinori Morita, Yoshiki Hashioka, Etsuko Kumamoto, Hiromu Kutsumi, Takeshi Azuma, Kagayaki Kuroda, Visualization of porcine gastric ulcer in vivo using intracavitary RF probe and its navigation system, ISMRM 23rd Annual Meeting, 2015 年 6 月 4 日, Toronto (Canada)

Yuichiro Matsuoka, Yoshinori Morita, Etsuko Kumamoto, Hiromu Kutsumi, Takeshi Azuma, Kagayaki Kuroda, In vivo MR imaging of porcine gastric ulcer model using intra-cavitary RF coil for MR-endoscope system, 10th Interventional MRI Symposium, 2014 年 10 月 10 日, Leipzig (Germany)

松岡 雄一郎, 熊本 悦子, 森田 圭紀, 久津見 弘, 東 健, 黒田 輝, MR 内視鏡システムにおける腔内 RF コイルによる動物胃病変モデルのイメージング, 第 42 回日本磁気共鳴医学会, 2014 年 9 月 19 日, ホテルグランヴィア京都(京都府京都市)

Akihiro Takahashi, Etsuko Kumamoto, Yuichiro Matsuoka, Yoshinori Morita, Hiromu Kutsumi, Takeshi Azuma, Kagayaki Kuroda, Multi planar reconstruction technique for MR-endoscope system based on scope tip tracking with gradient field sensor, Joint Annual Meeting ISMRM-ESMRMB2014, 2014 年 5 月 14 日, Milan (Italy)

高橋 明大, 熊本 悦子, 松岡 雄一郎, 森田 圭紀, 久津見 弘, 東 健, 黒田 輝, MR 内視鏡ナビゲーションにおけるワイヤレスコントローラの利用可能性の検討, 第 41 回日本磁気共鳴医学会, 2013 年 9 月 19 日, アスティとくしま(徳島県徳島市)

Etsuko Kumamoto, Akihiro Takahashi, Yuichiro Matsuoka, Yoshinori Morita, Hiromu Kutsumi, Takeshi Azuma, Kagayaki Kuroda, Navigation technique for MR-endoscope system using a wireless accelerometer-based remote control device, 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS, 2013 年 7 月 6 日, Osaka International Conference Center (大阪府大阪市)

Akihiro Takahashi, Etsuko Kumamoto, Yuichiro Matsuoka, Kagayaki Kuroda, Usefulness of the WiiTM remote controller for image manipulation of MR-endoscope system, ISMRM 21st Annual Meeting, 2013 年 4 月 24 日, Salt Lake City (USA)

松岡 雄一郎, 高橋 明大, 熊本 悦子, 森田 圭紀, 坂井 文, 竹中 完, 久津見 弘, 東 健, 黒田 輝, MR 内視鏡システムにおける撮像設定迅速化のためのナビゲーション, 第 40 回日本磁気共鳴医学会, 2012 年 9 月 6 日, 国立京都国際会館(京都府京都市)

Yuichiro Matsuoka, Akihiro Takahashi, Etsuko Kumamoto, Yoshinori Morita, Mamoru Takenaka, Aya Sakai, Hiromu Kutsumi, Takeshi Azuma, Kagayaki Kuroda, Navigation for adequate MR scan with integrated MR-endoscope system using intraluminal RF coil, 9th Interventional MRI Symposium, 2012 年 9 月 22 日, Boston (USA)

Yuichiro Matsuoka, Etsuko Kumamoto, Akihiro Takahashi, Yoshinori Morita, Hiromu Kutsumi, Takeshi Azuma, Kagayaki Kuroda, Navigation of quick MR scanning setup with intraluminal RF coil for integrated MR-endoscope, ISMRM 20th Annual Meeting, 2012 年 5 月 8 日, Melbourne (Australia)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松岡 雄一郎 (Matsuoka, Yuichiro)

独立行政法人情報通信研究機構脳情報通信融合研究センター脳機能計測研究室・主任研究員

研究者番号：80372150

(2) 連携研究者

森田 圭紀 (Morita, Yoshinori)

神戸大学医学部附属病院・講師

研究者番号：60420460