

平成 21 年 6 月 24 日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007 年度 ～ 2008 年度  
 課題番号：19790886  
 研究課題名（和文）  
 MRI 画像生成シミュレーションによる放射線検査技術教育システムの開発  
 研究課題名（英文）  
 Education System for Diagnostic Radiology with MR Imaging Simulation  
 研究代表者  
 堀 謙太 (HORI KENTA)  
 群馬県立県民健康科学大学・診療放射線学部・講師  
 研究者番号：90378836

## 研究成果の概要：

本研究は、MRI 撮像技術の実機による実習の補完としてのコンピュータシミュレーション技術による擬似体験教育法の確立を目的とする。本研究では中核となる MRI 撮像シミュレーション技術の精度の検証を軸に研究を進めた。研究の結果、元となる実測データに撮像条件に近い条件であれば良好なシミュレーション結果が得られることが確認された。また、携帯アプリとして簡単なシミュレータを構築して教材としての有効性を確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,600,000	0	1,600,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	390,000	3,290,000

## 研究分野：医歯薬学 B

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線化学

キーワード：画像診断学、放射線技師教育、画像診断、MRI、コンピュータシミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

MRI、CT 等の画像診断技術は、非侵襲的に人体内の状態を画像化できる技術であり、手術など人体を傷つける治療で人体への侵襲を必要最小限に抑えるために重要な役割をもつ。画像診断技術は、人体内部の状態を情報化して取得する技術であり、正確な計測のためには専門的な知識と経験が必要不可欠である。したがって、画像診断機器を扱う人材の教育においては、計測技術について学習することとあわせて実機を用いた実習などの体験型の学習が行われる。

しかし、画像診断機器の多くは、導入だけ

でなく運用にもコストがかかる高価な設備である。特に、MRI は高磁場の維持や遮蔽等、機器を使用する環境の制約が厳しいために、導入・運用・保守ともに莫大なコストがかかる。診断業務などのコスト回収の手段を持たない教育機関では導入・運用における負担は大きい。近隣の医療機関で学外実習を行う方法も考えられるが、診療業務の合間に行うために、利用時間も含めて利用に関する制限は多い。機器の貸し出しサービスの利用も考えられるが、機器を導入するよりは安価であるものの高いコストがかかることには変わりはなく、また、あくまでも借り物なので、

自由に使うことは出来ない。以上のように、医療系の教育機関において、画像診断機器の実習は重要ではあるものの、十分な機会が確保できていないのが現状である。

同様の問題は、医学教育全般にも言えることであるが、近年、医学教育の分野ではシミュレーション技術を用いて体験型教育の機会を補う試みが行われている。医療技術の体験型教育は安全性や倫理面での問題から十分な実習の機会を確保することが難しいが、コンピュータシミュレーションでは安全に何度でも実習を行うことが出来るため、教育上の学習効果が高いことはすでに知られている。画像診断技術の教育においてもコンピュータシミュレーション導入による学習効率の向上が期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究は、画像診断技術の実習教育を補うための教育システムの開発を目的とし、画像診断技術のコンピュータシミュレーション技術の中核とする、実機による実習教育の補助として体験学習の機会を提供するための情報システムの実現を目指す。本研究では特に撮像原理が複雑な MRI を対象とする。具体的には、1)MRI の計測原理に基づくコンピュータシミュレーション技術を用いた教育プログラムについて検討を行い、2)検討した教育プログラムに対応する情報システムを構築・評価し、画像診断技術の実践教育の方法論についての指標を得ることを目指す。

画像計測、画像検査技術の体験型教育では、座学で学んだ理論について、実際の画像診断機器を用いて様々な実験を行うことで、画像診断について理解を深めることが目的である。しかし、現実には機器の使用機会や取り扱い方法の制約により十分な実習の機会が得られず、用意された手順を単純になぞるだけになってしまい、学習者が画像診断技術について自分自身で考え、理解を深める十分な機会が提供されていない。

本研究は、体験型教育の本筋に立ち返り、コンピュータシミュレーションにより何度も繰り返し学習を行うことが出来る体験型教材の構築を目的とする。コンピュータ上でのシミュレーションであるので、人体や機器への影響を考慮せず、様々な条件での画像診断の仮想体験が可能となる。これにより、従来の「単なる実機の使用体験」ではなく「理論を確認するための実験学習」という体験型教育の本質に立ち返った教育機会の提供が可能となる。さらに、実習計画の立案にコンピュータシミュレーションを活用するなど、実機による実習と組み合わせることで、限られた実習の機会を効果的に活用できるなど、教育効果の向上が期待できる。

また、システム自体はあくまで情報システ

ムであるので、実機を導入・運用する場合と比較して、コストを大幅に削減することが可能である。特に、本研究で対象とする MRI は機器だけでなく運用環境も適切な整備が必要で導入・運用のコストが高いため、コンピュータシミュレーション導入による費用対効果は特に高いと考えられる。

## 3. 研究の方法

本研究では、MRI 撮像技術の実習教育を補うため疑似体験型教育プログラムと、必要となる MRI 撮像シミュレーション技術が中核となる。MRI 撮像技術の実機による実習教育では機器の取扱いに高い専門知識を要するため、安全管理上、専門の教員もしくは技術職員の立ち会いが必要となる。したがって、学生が実機を使用できる機会はあらかじめ設定された実習時間のみに限られ、すべての学生に十分な実習機会を提供することが難しい。また、実習時間の制限により臨床でよく用いられる撮像条件を優先して実習せざるを得ず、学生自身が様々な撮像条件を試行することは困難である。

本研究で想定する疑似体験型教育プログラムでは、MRI の実機による実習教育を補完することを目的としている。実習教育で最も大きい問題は、すべての学生に対して学習の機会を十分に確保することが難しいことである。本研究の疑似体験型教育プログラムでは、実機による実習教育の内容の一部または全部をコンピュータシミュレーションによる疑似体験で代替することで、すべての学生に対して学習の機会を十分に提供できることが求められる。したがって、本研究では、実習時間中の教育指導だけでなく、学生自身の自主学習も併せて考慮する必要がある。すなわち、学生が自由に自主学習できるように、様々な撮像条件を自由に試行し、効率よく反復学習できることが求められる。

以上より、本研究の教育用 MRI 撮像シミュレーション技術では、様々な撮像条件に対して十分な精度のシミュレーション結果を高速に生成し提示することが求められる。シミュレーション精度については、少なくとも見た目に違和感がない程度の精度が求められる。また、決められた実習時間以外でも学生自身が自主学習に使うことを考えると、実習用にあらかじめ用意された計算機だけでなく、学生が所有する低コストのコンピュータ端末や携帯電話等の携帯情報端末においても十分な反復学習が行えるよう、少ない計算コストで十分な結果を得ることが出来る軽量なシミュレーションモデルが必要となる。

MRI のシミュレーション技術としては、MRI の撮像原理である核磁気共鳴現象を忠実にモデル化する手法がある。しかし、計算モデルが複雑であり、実測データと同程度の解像

度の断層像を生成するには長い計算時間を要する。本研究の教育用 MRI 撮像シミュレーション技術では簡単な手法として、核磁気共鳴現象の再現ではなく、T1 緩和時間、T2 緩和時間、プロトン密度等の MRI における撮像対象の物理特性と撮像条件の設定値に対する信号強度の関係式により、注目断面における信号強度分布を計算する手法を用いる。

本研究では、信号強度の関係式による高速な断層像生成シミュレーション技術について、実測データを元に撮像対象の物理特性についてのパラメータを推定し、シミュレーション精度を検証した。また、本研究における MRI 撮像シミュレーション技術を用いて携帯情報端末上に簡単な MRI 撮像シミュレーションソフトウェアを試作した。

#### (1) MRI 撮像シミュレーションにおけるモデルパラメータ推定と精度の検証

本研究では、信号強度の関係式に基づく MRI 撮像シミュレーションについて、精度の検証を試みた。シミュレーションを行うには、撮像対象の物理特性に関するパラメータとして、注目断面の各位置における T1 緩和時間、T2 緩和時間およびプロトン密度を、実測データから推定する必要がある。

T1 緩和時間は、spoiled gradient recalled echo (SPGR) パルスシーケンスの実測データから推定した。具体的には、SPGR シーケンスの撮像パラメータのうちフリップ角のみを変更した 2 種類のデータに対して SPGR シーケンスの信号強度の関係式を解析的に解くことで計算した。T2 緩和時間は、スピンエコー (SE) パルスシーケンスの実測データから推定した。具体的には、SE シーケンスの撮像パラメータのうちエコー時間 TE のみを変更した 2 種類以上のスライスデータを使用し、SE シーケンスの信号強度の関係式から最小二乗法で推定した。プロトン密度は、SE シーケンスの実測データから T1 緩和時間と T2 緩和時間の推定値を使用して計算した。

精度の検証については、CuSO<sub>4</sub> 水溶液ファントムおよび成人健常者の頭部横断面の 2 種類の撮像対象について実施した。シミュレーションの精度として、各撮像条件における実測データとシミュレーション結果との誤差を検証するとともに、断層上に設定したいくつかの ROI について各パルスシーケンスにおける撮像条件の違いに対する信号強度の変化を検証した。ROI の位置については、CuSO<sub>4</sub> 水溶液ファントムでは中心と上下左右の計 5 カ所、頭部横断面では白質に対応する箇所と灰白質に対応する箇所の計 2 カ所とした。ROI の大きさは縦横各 3 画素とした。パルスシーケンスについては、モデルパラメータ推定に使用する SPGR シーケンスおよび SE シーケンスに加え、モデルパラメータ推定に使用しな

いものとして、inversion recovery (IR) パルスシーケンスを使用することとした。本研究で使用した撮像条件は以下の通りである。

- CuSO<sub>4</sub> 水溶液ファントム
  - SPGR シーケンス：TR=60ms, TE=6ms, フリップ角=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90°
  - SE シーケンス：TR=2000ms, TE=30, 60, 120, 250, 500ms
  - IR シーケンス：TR=4000ms, TE=10ms, TI=100, 300, 500, 800, 1000, 1500, 2000, 3000ms
- 成人健常者の頭部横断面
  - SPGR シーケンス：TR=30ms, TE=6ms, フリップ角=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90°
  - SE シーケンス：TR=5000ms, TE=20, 30, 60, 80, 100ms
  - IR シーケンス：TR=2670ms, TE=20ms, TI=40, 80, 160, 320, 480ms

#### (2) 携帯型 MRI 撮像シミュレータの試作

本研究では、信号強度の計算式に基づく MRI 撮像シミュレーションソフトウェアを実際に携帯情報端末上に実装した。実装は、米 Google 社が提供するオープンモバイルプラットフォーム”Android”上で行った。パルスシーケンスは SE シーケンスのみとし、撮像パラメータは繰り返し時間 TR およびエコー時間 TE を設定できるようにした。モデルデータには、(1)の成人健常者の頭部横断面のデータを使用した。また、実装したソフトウェアを Android の開発用端末である Google 社製 Android Dev Phone 1 で動作させ、使用感等について診療放射線技師教育に従事する専門教員 10 名程度にヒアリングを行った。

## 4. 研究成果

### (1) MRI 撮像シミュレーションの精度検証

#### ① CuSO<sub>4</sub> 水溶液ファントム

図 2 に CuSO<sub>4</sub> 水溶液ファントムにおける実画像とシミュレーション画像の比較結果の一部を示す。また、図 3 に CuSO<sub>4</sub> 水溶液ファントムにおける、各 ROI での撮像条件の違いに対する信号強度の変化を示す。なお、図 3 では、T1 の推定でのフリップ角の組み合わせを (10°, 90°)、(20°, 50°)、(30°, 40°) とした場合の結果を示す。

SPGR シーケンスについては、いずれの ROI でも若干の誤差が見られたものの、ほぼ実測値に近いシミュレーション結果が得られることが確認された。均質なファントムであるにもかかわらず ROI によって信号強度の実測値が異なっており、実測値とシミュレーション結果との誤差も ROI によって異なった。また、T1 の推定におけるフリップ角の組み合わせ

せによるシミュレーション結果の違いは少なかった。ただし、本実験ではパラメータ推定に使用しているデータと近い撮像条件のデータについてしか検証できていないため、同じ SPGR シーケンスでも、撮像条件がパラメータ推定用のデータとは大きく異なる場合についての検証が、今後、必要である。

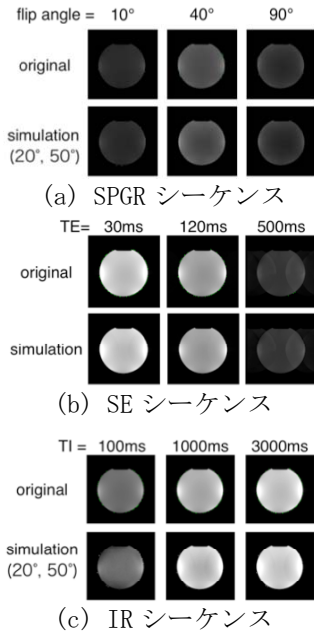


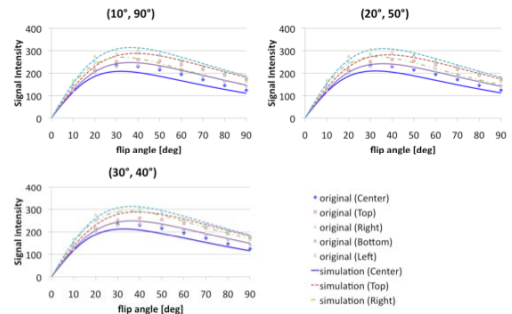
図2 CuSO<sub>4</sub>水溶液ファントムにおける実画像とシミュレーション画像

SE シーケンスについては、いずれの ROI でも実測値とシミュレーション結果はほぼ一致しており、十分に高い精度でシミュレーションできることが確認された。なお、プロトン密度を推定する際に SE シーケンスの実測値と T1 の推定値から計算していること、および、SE シーケンスのシミュレーション精度の検証に推定用のデータをそのまま使用していることから、T1 推定における SPGR シーケンスのデータのフリップ角の組み合わせによる違いはない。SPGR シーケンスと同様、同じ SE シーケンスでも撮像条件がパラメータ推定用のデータとは大きく異なる場合についての検証が必要である。

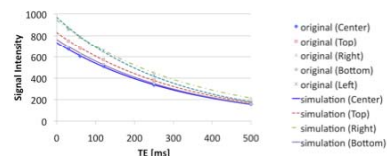
IR シーケンスについては、いずれの ROI でも実測値よりもシミュレーション結果の方が、信号強度値が高くなる傾向が見られた。T1 推定における SPGR シーケンスのデータのフリップ角の組み合わせによる違いが見られなかったこと、および、均質なファントムであるにもかかわらず ROI によって信号強度の実測値が異なることについては、SPGR シーケンスの結果と同じであった。

以上の結果より、本実験では SPGR シーケンスおよび SE シーケンスについては実測データに近いシミュレーション結果が得られたことが確認できた。いずれもモデルパラメータ

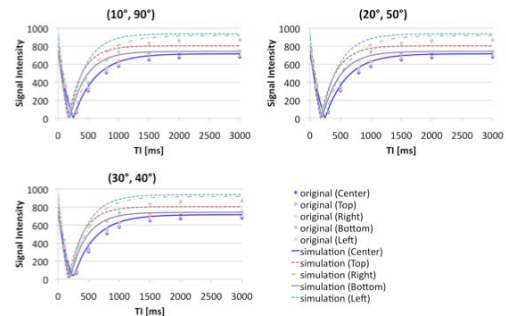
ータ推定に使用したデータと同じ、あるいは近い撮像条件であることから、モデルパラメータ推定に使用したデータに近い撮像条件においては、誤差の少ないシミュレーション結果が得られる可能性が高い。したがって、断層像についても実測データに近いコントラストの断層像が得られる可能性が示唆されたと考えることができる。



(a) SPGR シーケンス



(b) SE シーケンス



(c) IR シーケンス

図3 CuSO<sub>4</sub>水溶液ファントムにおける信号強度の変化

一方、IR シーケンスではいずれの ROI でも信号強度のシミュレーション結果は実測データより高く、誤差が大きいが確認された。IR シーケンスのデータについては、モデルパラメータ推定に使用した実測データとはパルスシーケンスが異なる。モデルパラメータ推定に使用したデータと撮像条件が大きく異なる場合には誤差が大きくなる可能性が高いと考えられる。

## ②成人健常者の頭部横断面

図4に成人健常者の頭部横断面における実画像とシミュレーション画像の比較結果の一部を示す。また、図5に成人健常者の頭部横断面における、各 ROI での撮像条件の違いに対する信号強度の変化を示す。なお、図5では、T1 の推定でのフリップ角の組み合わせを(10° , 90° )、(10° , 60° )、(30° , 70° )、

(40°, 90°) とした場合の結果を示す。

SPGR シーケンスについては、CuSO<sub>4</sub> 水溶液ファントムの場合と違い、T1 推定におけるフリップ角の組み合わせに対してシミュレーション結果と実測値の誤差が異なることが確認された。いずれの ROI でも、フリップ角の組み合わせが(10°, 60°)の場合がもっとも実測値に近いシミュレーション結果が得られた。断層像でも同様に、(10°, 60°)の場合がもっとも実測データに近いシミュレーション画像が得られることが確認された。しかし、組織によっては実測データとは大きく異なる信号強度が算出されている様子が確認された。また、組織の輪郭において誤差が若干大きくなる傾向が確認された。

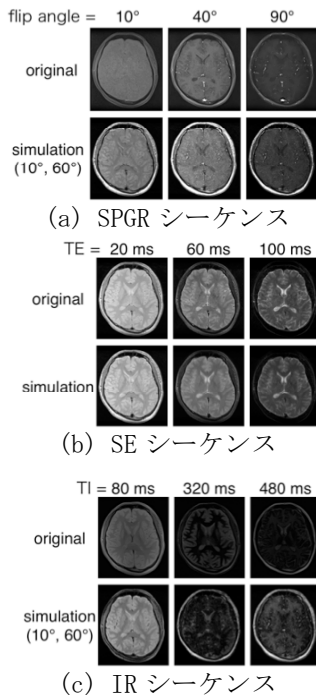


図4 成人健常者の頭部横断面における実画像とシミュレーション画像

SE シーケンスの結果については、CuSO<sub>4</sub> 水溶液ファントムの場合と同様に、いずれの ROI でも実測値に近いシミュレーション結果が得られた。断層像全体で見た場合、組織の輪郭において誤差が見られるものの、全体的にはほぼ実測データに近いシミュレーション画像が得られていることが確認された。

IR シーケンスの結果については、フリップ角のいずれの組み合わせに対しても実測値とシミュレーション結果の誤差が大きく、良好な推定結果は得られなかったことが確認された。IR シーケンスのシミュレーション画像では、全体的に細かいノイズが多くなることが確認された。

以上の結果より、頭部横断面についても全体的には CuSO<sub>4</sub> 水溶液ファントムの場合と同様、パラメータ推定に使用したデータに近い

撮像条件については比較的良好なシミュレーション画像が得られることが確認された。しかし、IR シーケンスについては全体的に誤差が大きく、良好なシミュレーション画像は得られなかった。

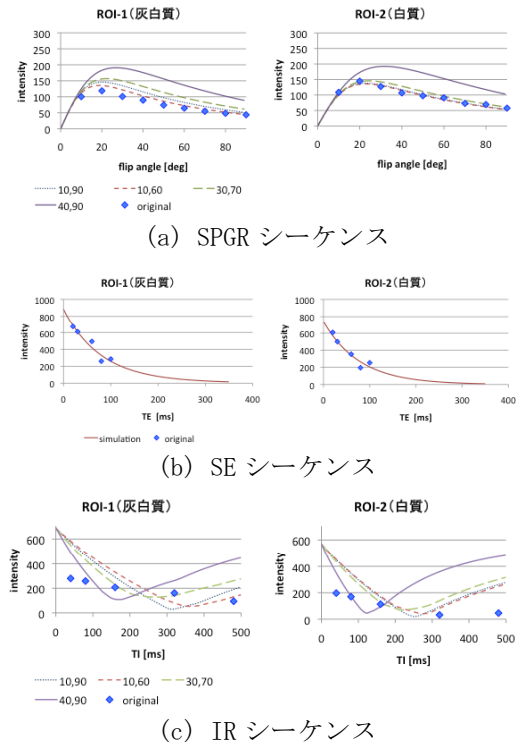


図5 成人健常者の頭部横断面における信号強度の変化

誤差の要因としては、モデルパラメータの推定誤差、および実測データの撮像時における時間経過の影響が考えられる。モデルパラメータの推定誤差については、推定用データの取得においてほとんどの撮像パラメータを全条件で統一しておく必要があるため、レシーバゲイン調整等のノイズ軽減のためのパラメータ調整が大幅に制限されることが考えられる。フリップ角の組み合わせによる誤差の違いについても、フリップ角の設定により縦磁化の回復量が異なることから、組み合わせ方によりノイズの影響の程度が異なることが原因と考えられる。時間経過の影響については、血流等の体液の流動、および体動による位置のずれが考えられる。

#### (2) 携帯型 MRI 撮像シミュレータの試作

実際に Android 端末上で MRI 撮像シミュレーションソフトウェアが動作する様子を図 2 に示す。図 2 左は本アプリケーションの基本画面で、シミュレーション画像の下に TR および TE の設定値を表示するようにした。TR および TE については、設定値の表示部分をタッチすることで、図 2 右に示す数値入力画面に切り替わる。数値を入力して確定ボタンをタッチすることでシミュレーション画像を生成し、図 2 左の画面に表示する。

専門教員によるヒアリングの結果では、ほぼ全員に対しておおむね好評であったが、たとえば T2 強調画像については違和感を感じないが T1 強調画像では何となく違和感を感じるとの意見があるなど、画像生成については改良が必要であることが確認された。



図 6 携帯型 MRI 撮像シミュレータの動作例

### (3) 結論

本研究では、主にシミュレーション精度の検証を軸に MRI 撮像技術のシミュレーション教材について研究を進めた。モデルパラメータの推定については古くから研究が進められているものの、推定したモデルパラメータから断層像を計算して精度の検証を行った例は少ない。研究の結果、モデルパラメータ推定に使用したデータに近い撮像条件に限定すれば実測データに近いシミュレーション結果が得られるものの、大きく異なる撮像条件では良好なシミュレーション結果が得られないことが確認された。ただし、T1 の推定については 2 種類のデータのみから解析的に計算する手法を用いており、今後は非線形回帰分析等のより高度な推定手法についての検証を進める必要がある。また、携帯型 MRI 撮像シミュレータを試作し、診療放射線技師教育の専門教員にヒアリングすることで、一部の撮像条件では違和感を感じる等、主観的に十分良好なシミュレーション結果が得られていないとの評価があることから、シミュレーション結果の主観評価手法についても検討の必要性があることが確認された。

一方で、研究当初に目的としてあげていた、疑似体験型教育プログラムの検討については、中核となる MRI 撮像シミュレーション技術について良好なシミュレーション精度が得られなかったこともあり、十分な検討ができたとはいえない。今後、本研究で試作した携帯型 MRI 撮像シミュレータを元に具体的な検討及び評価を進める必要がある。

### 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)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 堀謙太、柏倉健一、星野修平、根岸徹、下瀬川正幸、小倉敏裕、野中博意、小島

隆行、佐藤哲大、岡田知久、五十嵐均、教育用 MRI 撮像シミュレーション技術におけるシミュレーション精度の検証、生体医工学、47 巻 2 号、(掲載予定)、2009 年、査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① 堀謙太、柏倉健一、星野修平、根岸徹、下瀬川正幸、小倉敏裕、野中博意、小島隆行、佐藤哲大、岡田知久、五十嵐均、診療放射線技術教育を目的とした MRI 撮像シミュレーションとモデルデータの生成、生体医工学シンポジウム 2007、2007 年 9 月 21 日、北海道大学大学院情報学研究科
- ② 堀謙太、柏倉健一、星野修平、根岸徹、下瀬川正幸、小倉敏裕、野中博意、小島隆行、佐藤哲大、岡田知久、五十嵐均、放射線技術教育における MRI 撮像シミュレーション手法およびシミュレーションパラメータの推定法に関する検討、第 27 回医療情報学連合大会、2007 年 11 月 23 日、神戸コンベンションセンター
- ③ 堀謙太、柏倉健一、星野修平、根岸徹、下瀬川正幸、小倉敏裕、五十嵐均、診療放射線技術教育を目的とした MRI 撮像シミュレーション技術の検討、第 64 回日本放射線技術学会総会学術大会、2008 年 4 月 6 日、パシフィコ横浜
- ④ 堀謙太、柏倉健一、星野修平、根岸徹、下瀬川正幸、小倉敏裕、野中博意、小島隆行、佐藤哲大、岡田知久、五十嵐均、教育用 MRI 撮像シミュレーション技術におけるシミュレーション精度の検証、生体医工学シンポジウム 2008、2008 年 9 月 21 日、大阪大学大学院基礎工学研究科
- ⑤ Kenta Hori、Kenichi Kashikura、Tetsuo Sato、Tomohisa Okada、Takayuki Obata、Hitoshi Igarashi、Estimation of Model Parameters and Evaluation of Simulation Accuracy in Educational Simulator of MR Imaging、International Forum on Medical Imaging in Asia 2009、2009 年 1 月 21 日、National Taiwan University、Taipei、Taiwan

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

堀 謙太 (HORI KENTA)  
群馬県立県民健康科学大学  
研究者番号：90378836

#### (2) 研究分担者

(なし)

#### (3) 連携研究者

(なし)