

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K19917

研究課題名（和文）圧縮センシングと深層学習の融合による新たなMRI画像再構成法の開発

研究課題名（英文）Development of a new MRI image reconstruction by the fusion of compressed sensing and deep learning

研究代表者

藤本 晃司（Fujimoto, Koji）

京都大学・医学研究科・特定准教授

研究者番号：10580110

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：ラディアルスキャンで得られた計測データを用いて様々な時間遅れに相当するシミュレーションを行うことで、位置補正に必要なデータを生成し、ゼロ次項に関する補正を行った結果、画像のアーチファクトが減少することを確認し、国際学会にて報告した。深層学習に関しては、入力直後に学習済みのVGG19を接続し、後段に多段のUpSampling層を接続した。VGG19に相当する入力層から第23層までを学習させないように設定した上で、間引き収集されたMRI画像を入力画像、間引き収集しないMRI画像を出力画像として、5000枚の膝MRI画像を用いて学習を行った結果、良好な画像を復元することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
画像再構成に深層学習の手法を融合させることができれば、画像再構成に要する時間の飛躍的な短縮がはかれ、臨床応用を加速する大きなポイントになりうる。深層学習を用いたMRI画像再構成研究はまだ萌芽期であり、ネットワークの構成、学習方法の最適化、画質評価の手法など今後も検討が必要である。画質劣化を伴わずにMRIの高速撮像が可能となれば、高齢者や小児など、臨床において長時間のMRI撮像が負担となる患者にとって、大きなメリットとなりうる。

研究成果の概要（英文）：By using a measured data from radial scan MRI, simulated data with varying degree of time delay in the acquisition was generated. A correction method for this delay was reported at the international conference (international society for magnetic resonance in medicine, ISMRM 2020, abstract number #0657). For the deep learning network, a network consists of VGG19 and the following upsampling layers (Conv2DTranspose, Dropout, concatenate, BatchNormalization, Activation) was constructed and trained with 5000 knee MRI images, with a successful image recovery.

研究分野：MRI

キーワード：圧縮センシング 深層学習

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は新学術領域研究(「疎性モデリング」)および留学先での活動を通じて、少数のデータからアーチファクトの少ないMRI画像を凸最適化問題を解くことによって求める圧縮センシング(Compressed Sensing, CS)の研究をながく行ってきた。圧縮センシングはすぐれた手法であるが、(1)疎性にウェーブレットなどの既存の基底を用いる点、(2)再構成に時間がかかる点が問題となるため、適用可能な範囲が血管の描出や心臓の動きの評価などに限られる。さらに、(3)データ収集空間と再構成空間との間にインコヒーレンス性を要求するため、ランダムサンプリングを必要とする。そのため(3-1)撮像の自由度が制限される(3-2)SENSEやGRAPPA、CAIPIRHINIAといった従来の高速撮像手法に適用することが難しいという問題点があった。いっぽう、近年、深層学習の手法を医用画像データへ適用したという報告が多数みられるようになってきた。当初は画像内の臓器や病変のセグメンテーション、病変の検出(detection)、病変の鑑別診断(diagnosis)といった、従来のCAD(Computer Aided Diagnosis/Detection)の対象となっていた課題への適用が報告されていたが、近年では深層学習の方法を用いて画像再構成を行うおうとする試みが報告されている。[Zhu et al, Nature. 2018 Mar 21;555(7697):487-492. doi: 10.1038/nature25988][Zbontar et al. arXiv:1811.08839]

従来、深層学習で取り扱ってきた課題が「検出、判断」といった「人間の認知の代わり」を目指していたのに対し、深層学習を用いた画像再構成は(フーリエ変換など)すでに明らかな物理第一原理そのものを含めて訓練・学習させる点で目指している方向が大きく異なる。

研究代表者はこの斬新さに注目し、大きな可能性があると考えた。しかしながら、このようなアプローチが有効かどうかを明らかにするには、圧縮センシングなどの従来法を基準として、融合をはかり、新たな手法の利点・欠点を明らかにすることが必要不可欠であると考えた。深層学習を用いた生データからの画像再構成という手法は、「そのようなことが可能である」ということが報告されたばかりで、実際にどの程度の画質なのか、実際に我々が行って同様のことが可能か、などよくわからないことだらけである。研究者のあいだでも、この手法に関して懐疑的な反応を示す者も多い。しかしながら、もし画像再構成に深層学習の手法を融合させることができれば、画像再構成に要する時間の飛躍的な短縮ははかれ、それが臨床応用を加速する大きなポイントになる。

2. 研究の目的

MRIのデータ収集過程で生じる計測エラーには(1)生体内のプロトンの熱運動によるノイズ(2)観測対象の動きによる位相エラー(3)撮像に用いる勾配磁場生成のための勾配磁場コイル用アンプの非線形性による時間遅れ(gradient delay)が挙げられる。これらのほかに、間引き収集データからの画像再構成には(4)観測していないk-space(周波数領域で観測されるMRIの生データ)にゼロを埋める操作(zero-filling)によるエラー(Nyquist ghost)がある。従来のCSでは主に(4)に対して、観測したデータとの誤差を最小に保ちつつ観測対象の疎性を活用することにより画像再構成を行っている。本研究ではCSを用いたMRIの画像再構成にさらなる深化をもたらし、以下の二つのアプローチで深層学習との融合を図ることに挑戦する。

- (1) MRI装置の不完全性の学習
- (2) MRIデータからの疎表現の学習、CSとの融合

3. 研究の方法

(1) MRI装置の不完全性の学習

MRI装置は勾配磁場コイルを用いて空間的に線形に変化する磁場を一時的に形成することで、フーリエ変換の仕組みを利用して生体内プロトン信号の位置情報を取得している。しかしながら、MRIでは(a)高速撮像を実現するため(b)信号の減衰時間が早いためにこの勾配磁場はミリ秒単位で変化させなくてはならず、実際の撮像で用いられる勾配磁場は必ずしも線形とみなせない。CSによる画像再構成で用いられる生成モデルは必ずしも現実を反映しているとはいえないが、CS単独ではこの問題を取り扱うことはできない。そこで、機械学習を用いてMRI装置の不完全性を学習することで取得されたデータに含まれる歪みを補正することを考える。具体的には、以下の枠組みで深層学習を利用する。まず、MRI装置内の磁場空間の時間変動を正確に計測するためのfield probeを用いて、ファントムを対象にした撮像で勾配磁場コイル用アンプの非線形性による時間遅れの正確な計測を行う。従来はこの時間遅れの情報を使って、実際に取得されたk-space dataの位置を補正し、gridding等の手法を用いて再構成画像を得ていた。本研究では深層学習ネットワークのひとつであるU-NET(入力層と出力層の要素数が一致するように構成された深層学習ネットワーク)を用いてこの位置補正とgriddingを同時に行う。

(2) MRIデータからの疎表現の学習、CSとの融合

圧縮センシングでは、求めたい画像が何らかの疎表現のもとで少数の基底の線形結合として表現できることを利用している。凸最適化問題を解くアルゴリズムの制約から、この疎表現基底として利用可能なものはウェーブレット変換や隣接画素との差分(TV)など一部に限られる。その

理由は疎表現空間への射影の逆変換が存在しない、あるいは容易に計算できないためと考えられる。深層学習で用いられる階層構造は疎表現基底を多数のデータから学習する枠組みととらえることができるが、本研究では疎表現基底を学習するのみならず、その逆変換も同時に学習することでCSへの融合を図る。具体的には、VGG16の中間層を疎表現基底と捉え、U-NETを用いて疎表現から元画像に復元するためのフィルタを深層学習ネットワークで構成する。その後、U-NETの中間層にCSで用いる逐次軟閾値(iterative soft thresholding)法に相当する階層を追加することで、最終的に復元された画像が従来の圧縮センシング法よりも優れているかどうかを評価する。MRIのデータは複素数であるのに対し、上記VGG16は実数データについてしか定義されていない。そこで、まず実数データについて検討を行ったのち、複素数のデータに対して拡張可能な枠組みを検討する。

4. 研究成果

(1) MRI装置の不完全性の学習

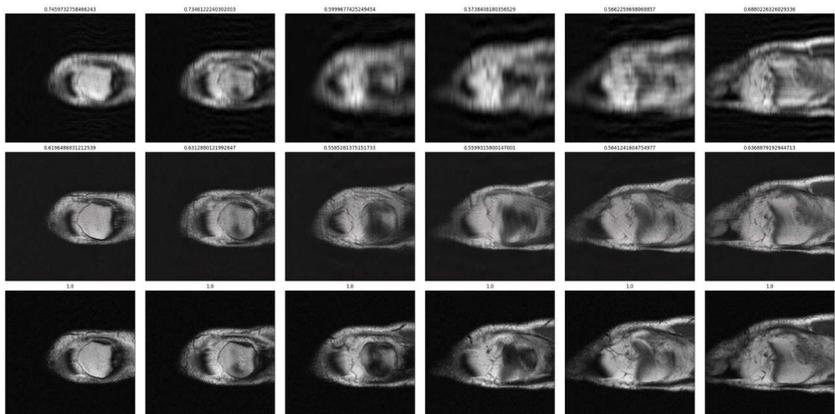
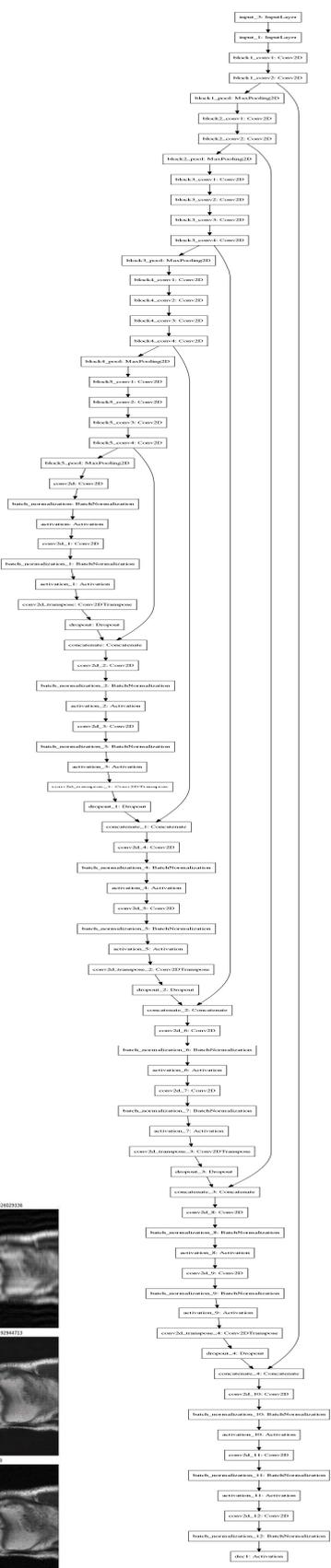
本研究で用いるMRI撮影用のパルスシーケンス(撮像プログラム、plug-and-play MRF)を本施設のMRI装置で用いるための交渉を、開発元のニューヨーク大学の研究者と行い、研究者を招聘して当施設のMRI装置での動作確認・検証を行った。フィールドプローブを用いた局所磁場強度の時間変動データを取得する前に、実際にplug-and-play MRFを用いて行ったラディアルスキャンで得られた計測データを用いて様々な時間遅れに相当するシミュレーションを行うことで、位置補正に必要なデータを生成した。また、上記データを用いてゼロ次項に関する位置補正を行った結果、画像のアーチファクトが著明に減少、MRFを用いて得られた定量計測値マップの精度が改善することを確認、国際学会で報告した。[ISMRM 2020 #0657]

また、上記補正が撮像方向や、空間分解能に依存するかどうかを検証するために、同一被験者で撮像方向を横断像、矢状断像、冠状断像と異なる3方向で撮影したデータ、および空間分解能をより高めたデータを追加で取得した。この解析結果をもとにした論文を投稿準備中である。

また、上記plug-and-play MRFで得られたk-space dataに対してグリidding (gridding)を行い画像再構成を行うプログラムを国際共同研究により開発した。これに加えて、MRIスキャナで得られたk-space dataを半自動的に再構成するための様々なスクリプトを開発し、稼働確認を行った結果、400症例以上の実データを蓄積した。

(2) MRIデータからの疎表現の学習、CSとの融合

GPUを搭載したlinuxワークステーションによる計算機グリッドを構築し、MRI画像を入力および出力とする深層学習ネットワークの構築を行った(右図)。入力直後に学習済みのVGG19を接続し、VGG19の後段に(Conv2DTranspose, Dropout, concatenate, BatchNormalization, Activation)から構成される多段のUpSampling層を接続した。VGG19に相当する入力層から第23層までを学習させないように設定した上で、間引き収集されたMRI画像を入力画像(下図上段)、間引き収集しないMRI画像を出力画像(下図下段)として、5000枚の膝MRI画像を用いて学習を行った結果、良好な画像を復元することが可能となった(下図中段)。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kurata Yasuhisa, Nishio Mizuho, Kido Aki, Fujimoto Koji, Yakami Masahiro, Isoda Hiroyoshi, Togashi Kaori	4. 巻 114
2. 論文標題 Automatic segmentation of the uterus on MRI using a convolutional neural network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computers in Biology and Medicine	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.combiomed.2019.103438	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yokota Yusuke, Fushimi Yasutaka, Okada Tomohisa, Fujimoto Koji, Oshima Sonoko, Nakajima Satoshi, Fujii Toshihito, Tanji Masahiro, Inagaki Nobuya, Miyamoto Susumu, Togashi Kaori	4. 巻 51
2. 論文標題 Evaluation of image quality of pituitary dynamic contrast enhanced MRI using time resolved angiography with interleaved stochastic trajectories (TWIST) and iterative reconstruction TWIST (IT TWIST)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Magnetic Resonance Imaging	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jmri.26962	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakai Hirotsugu, Nishio Mizuho, Yamashita Rikiya, Ono Ayako, Nakao Kyoko Kameyama, Fujimoto Koji, Togashi Kaori	4. 巻 27
2. 論文標題 Quantitative and Qualitative Evaluation of Convolutional Neural Networks with a Deeper U-Net for Sparse-View Computed Tomography Reconstruction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Academic Radiology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.acra.2019.05.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 藤本晃司	4. 巻 33
2. 論文標題 3Dグラディエント撮像の技術と今後の展望	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 インナービジョン	6. 最初と最後の頁 11-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakao KK, Kido A, Imai T, Abiko K, Fujimoto K, Horie A, Minamiguchi S, Tanaka S, Mandai M, Togashi K	4. 巻 74
2. 論文標題 Frequency and risk factors of thoracic metastases and optimisation of the use of cross-sectional chest imaging in follow-up patients with cervical cancer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Clinical Radiology	6. 最初と最後の頁 326.e1-326.e8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mri.2018.05.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fuseya Y, Muro S, Sato S, Tanabe N, Sato A, Tanimura K, Hasegawa K, Uemasu K, Kubo T, Kido A, Fujimoto K, Fushimi Y, Kusahara H, Sakashita N, Ohno Y, Togashi K, Mishima M, Hirai T.	4. 巻 30
2. 論文標題 Complementary regional heterogeneity information from COPD patients obtained using oxygen-enhanced MRI and chest CT	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLoS One	6. 最初と最後の頁 e0203273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0203273. eCollection 2018.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wake N, Chandarana H, Rusinek H, Fujimoto K, Moy L, Sodickson DK, Kim SG.	4. 巻 52
2. 論文標題 Accuracy and precision of quantitative DCE-MRI parameters: How should one estimate contrast concentration?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Magnetic Resonance Imaging	6. 最初と最後の頁 16-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mri.2018.05.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawagishi M, Kubo T, Sakamoto R, Yakami M, Fujimoto K, Aoyama G, Emoto Y, Sekiguchi H, Sakai K, Iizuka Y, Nishio M, Yamamoto H, Togashi K.	4. 巻 16
2. 論文標題 Automatic inference model construction for computer-aided diagnosis of lung nodule: Explanation adequacy, inference accuracy, and experts' knowledge.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLoS One	6. 最初と最後の頁 e0207661
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0207661	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 伏見育崇, 藤本 晃司, 岡田 知久, 山本 憲, 富樫かおり	4. 巻 38
2. 論文標題 神経放射線領域における圧縮センシング MRI の臨床応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本磁気共鳴医学会雑誌	6. 最初と最後の頁 87-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2463/jjmrm.2018-1656	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hikaru Fukutomi, Matthew F. Glasser, Katsutoshi Murata, Thai Akasaka, Koji Fujimoto, Takayuki Yamamoto, Joonas A. Autio, Tomohisa Okada, Kaori Togashi, Hui Zhang, David C. Van Essen, Takuya Hayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Does the Diffusion Tensor Model Predict the Neurite Distribution of Cerebral Cortical Gray Matter? ? Cortical DTI-NODDI	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 biorxiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1101/441659	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 久保田 菜々子, 原田 賢, 藤本 晃司, 岡田 知久, 井上 真郷
2. 発表標題 制約付きアンサンブル学習を用いた事後平均解の近似によるMR画像再構成
3. 学会等名 第38回日本医用画像工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Fujimoto, Tomohisa Okada, Dinh Ha Duy Thuy, Toru Ishii, Martijn A. Cloos, Yuta Urushibata, Hideto Kuribayashi, Tobias Kober, Nouha Salibi, Ravi Seethamraju, John Grinstead, Tadashi Isa
2. 発表標題 Advantages and pitfalls in the imaging with human 7T MRI scanner
3. 学会等名 2019 RSNA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名	Sayo Otani, Yasutaka Fushimi, Koji Fujimoto, Takayuki Yamamoto, Azusa Ota, Krishna W. Pandu, Sonoko Oshima, Yusuke Yokota, Satoshi Nakajima, Akihiko Sakata, Akira Yamamoto, Peter Speier, Christoph Forman, Michaela Schmidt, Tomohisa Okada, Kaori Togashi
2 . 発表標題	Compressed Sensing MR Angiography from Simulation Research to Clinical Practices
3 . 学会等名	2019 RSNA (国際学会)
4 . 発表年	2019年

1 . 発表者名	Koji Fujimoto, Martijn A Cloos, Atsushi Shima, Dinh Ha Duy Thuy, Nobukatsu Sawamoto, Ryosuke Takahashi, Tadashi Isa, Tomohisa Okada
2 . 発表標題	Age-related changes in tissue T1, T2 values of the human brain quantified by 2D PnP-MRF at 7T MRI
3 . 学会等名	ISMRM 2019 Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年	2019年

1 . 発表者名	Yusuke Yokota, Yasutaka Fushimi, Tomohisa Okada, Hikaru Fukutomi, Akira Yamamoto, Satoshi Nakajima, Gosuke Okubo, Sonoko Oshima, Koji Fujimoto, and Kaori Togashi
2 . 発表標題	Evaluation of image quality of pituitary dynamic contrast-enhanced MRI using TWIST and IT-TWIST
3 . 学会等名	ISMRM 2019 Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年	2019年

1 . 発表者名	Koji Fujimoto ¹ , Martijn A. Cloos ² , Dinh Ha Duy Thuy ¹ , Atsushi Shima ³ , Nobukatsu Sawamoto ⁴ , Ryosuke Takahashi ³ , Tadashi Isa ^{1,5} , Tomohisa Okada ¹
2 . 発表標題	Age-related changes in the brain tissue T1, T2 values quantified by 2D MRF in normal healthy volunteers measured at 7T MRI
3 . 学会等名	第46回日本磁気共鳴医学会大会
4 . 発表年	2018年

1. 発表者名 Thai Akasaka ¹ , Koji Fujimoto ² , Martijn Cloos ³ , Tomohisa Okada ² , Kaori Togashi ²
2. 発表標題 In Vivo Evaluation of MR Fingerprinting at 7T
3. 学会等名 ISMRM 2018 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohisa Okada ¹ , Hideto Kuribayashi ² , Lana G Kaiser ² , Yuta Urushibata ² , Nouha Salibi ³ , Ravi Teja Seethamraju ³ , Sinyeob Ahn ³ , Tadashi Isa ¹ , Koji Fujimoto ¹
2. 発表標題 Test-retest reproducibility of quantitative proton MRS using short-TE STEAM and semi-LASER sequences in young adult volunteer brains at 7T
3. 学会等名 ISMRM 2018 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohisa Okada ¹ , Yuta Urushibata ² , Tobias Kober ^{3,4,5} , Benjamin Schmitt ⁶ , Koji Fujimoto ¹
2. 発表標題 Cortical T2* and QSM maps at 7T: test-retest reproducibility, similarity and differences
3. 学会等名 ISMRM 2018 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Fujimoto ¹ , Martijn A. Cloos ² , Yuta Urushibata ³ , Tomohisa Okada ¹
2. 発表標題 Cortical T1 mapping with 3D MR Fingerprinting at 7T using a single transmit channel
3. 学会等名 ISMRM 2018 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toru Ishii, Koji Fujimoto, Hideto Kuribayashi, Yuta Urushibata, Nouha Salibi, Ravi Seethamraju, Ahn Sinyeob, Tadashi Isa, Tomohisa Okada
2. 発表標題 Age-related neurochemical changes in normal human brain: a proton MR spectroscopy study at 7T
3. 学会等名 ISMRM 2018 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Fujimoto ¹ , Yuta Urushibata ² , Hideto Kuribayashi ² , Tobias Kober ^{3,4,5} , Tadashi Isa ¹ , Tomohisa Okada ¹
2. 発表標題 Test-retest reproducibility of cortical thickness, B1+, and R1 in healthy young adults measured at 7T
3. 学会等名 ISMRM 2018 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Fujimoto ¹ , Yuta Urushibata ² , Hideto Kuribayashi ² , Tobias Kober ^{3,4,5} , Tadashi Isa ¹ , Tomohisa Okada ¹
2. 発表標題 Age-related changes in cortical thickness and R1 values measured at 7T
3. 学会等名 ISMRM 2018 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhisa Kurata, Mizuho Nishio, Koji Fujimoto, Masahiro Yakami, Aki Kido, Hiroyoshi Isoda, Kaori Togashi
2. 発表標題 Automatic segmentation of uterus with malignant tumor on MRI using U-net
3. 学会等名 CARS, 2018-Computer Assisted Radiology and Surgery Proceedings of the 32nd International Congress and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohisa Okada, Koji Fujimoto, Yuta Urushibata, Hideto Kuribayashi, Tobias Kober, Tadashi Isa
2. 発表標題 Age-related changes in thickness, R1 and R2* values of the cortex at 7T
3. 学会等名 i2i workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Fujimoto, Martijn A. Cloos, Tomohisa Okada
2. 発表標題 A simple method to estimate gradient delay for MRF
3. 学会等名 ISMRM 2020 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	New York University		