

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K07711

研究課題名(和文) 圧縮センシングの脳・頸部MRIへの応用

研究課題名(英文) Compressed Sensing for Brain and Neck MR Imaging

研究代表者

伏見 育崇 (Fushimi, Yasutaka)

京都大学・医学研究科・講師

研究者番号：90639014

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：圧縮センシングはスパース性(解にゼロが多い)のあるデータに対して、少ない情報収集(サンプリング)から解を求める新たな数学的手法である。MRIの画像はスパース性があると考えられ、少ないサンプリング数(撮影時間)であっても最適解を求められると予想されたため、本計画研究では、圧縮センシングMRIを臨床応用し、正解画像に限りなく同等かどうか、臨床診断に耐えるか、を評価する目的で、広範囲撮影、アーチファクト抑制、血管壁評価、造影剤減量に主眼を置いて検討し、圧縮センシングMRIの臨床撮影における有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

圧縮センシングMRIの臨床応用により、本来なら撮影時間のかかる広範囲撮影を比較的短時間で撮影することが可能になり、繰り返し画像再構成によるアーチファクト抑制も簡便に行うことが可能となった。圧縮センシングMRIの臨床応用の妥当性を証明できた。MRIの画質安定に貢献したことは学術的に意義があると考えられる。血管壁評価においては、血管壁と内腔のコントラストの向上、造影剤減量したMR撮影を可能にすることで造影剤コストや患者負担の軽減に繋がる可能性があり、社会的に意義があると考えられる。

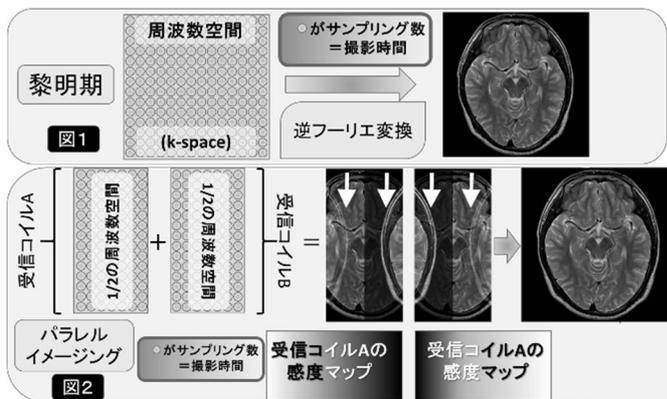
研究成果の概要(英文)：Compressive sensing is a novel mathematical method to find a solution from sparse sampling data. In this study, we focused on wide-coverage MR imaging, artifact suppression, vessel wall evaluation, and contrast agent reduction by using compressed sensing MRI. Clinical application of compressed sensing MRI was investigated, and the benefits of compressed sensing MRI was demonstrated.

研究分野：放射線医学

キーワード：圧縮センシング MRI 脳 MRA 造影剤

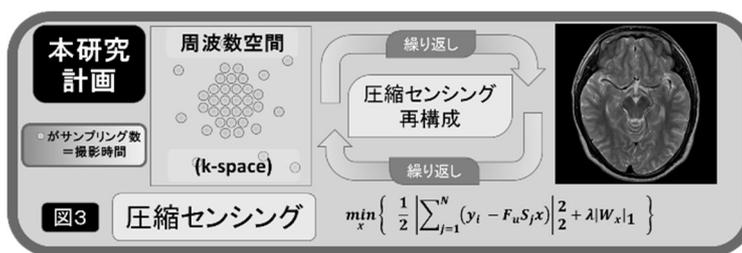
1. 研究開始当初の背景

MRI 検査の撮影時間は一般的に非常に長いため、MRI 技術研究の大半は撮影時間短縮が主目的であるといっても過言ではない。MRI 画像は、k-space と呼ばれる周波数空間の中にサンプリングしたデータを充填し、逆フーリエ変換することで作成される。データのサンプリング数により、撮影時間が決まるが、MRI 撮影の黎明期の



撮影時間は、周波数空間を全部埋めたサンプリングであったため、非常に長かった (図1)。現在では、周波数空間を 1/2 程度に分割して MRI 画像を再構成するパラレル・イメージングが広く用いられているが、パラレル・イメージングでは、図2の白矢印のように画像が折り返し合うため、各受信コイルの感度マップを利用して画像を復元する計算を行っている。この手法では、1/3 以上の分割の場合、画像が複雑に折り返し合うため、画像の復元が困難となり、撮影時間短縮に限界がある。

本研究計画の核となる圧縮センシング (図3) は、スパース性 (解にゼロが多い) のあるデータに対して、少ない情報収集 (サンプリング) から解を求める新たな数学的手法である。



MRI の画像はもともと黒色 (ゼロ) が多く、Wavelet 変換を行い、高周波・低周波成分に分離する操作を行うと図5のように、さらに黒 (ゼロ) が多くなる。圧縮センシングでは、前ページの本計画研究の図3のように、少ないサンプリング数 (撮影時間) であっても、画像に黒色 (ゼロ) が多いという事前知識を制約として設定することで、図3下段のように解けないはずの方程式を解くことが可能となり、撮影時間短縮が可能となる。圧縮センシング再構成の繰り返しにより、外れ値 (ノイズ) を取り除くことができる。

しかし、図4の方程式は決して正しく解けないのと同様に、圧縮センシング MRI も一定の法則で画像を推定しているだけで、決して正しく解けているわけではない。つまり、圧縮センシング MRI が正しい画像に限りなく同等かどうか、臨床診断に耐えうるかどうかについて、検証が必要であると考えられた。

2. 研究の目的

圧縮センシング MRI は、黒色 (ゼロ) が多いという制約のもとに推定された画像再構成方法である。そして、この推定の正しさは、サンプリング数 (撮影時間) にも依存する。本計画研究では、どこまでサンプリング数 (撮影時間) を減らしても正しい画像と同等の画像が求まるかということを基軸にしながら、以下の項目を検討することとした。(A) 圧縮センシングによる広範囲撮影の検討にて、広範囲の撮影に対しても圧縮センシングが診断能を保てるかどうか。(B) 圧

縮センシングによる体動アーチファクトの除去の検討にて、広範囲撮影は撮影時間延長に伴って生じる体動アーチファクトについて、圧縮センシング再構成を繰り返す過程でノイズ除去を行うことにより、体動によるアーチファクトの軽減につながるか。(C) 圧縮センシングによる血管壁イメージングの検討にて、圧縮センシングによるノイズ除去効果により血管内の信号を除去した血管壁の動脈硬化の描出能の検討。撮影時間短縮以外にも圧縮センシングの可能性を探るため、(D) 圧縮センシングによる使用造影剤の減量の検討にて、静脈内にガドリニウム造影剤（腎排泄）を注射して撮影する画像についても、造影剤を減量しても、圧縮センシングにより診断能が担保できるかの検討も行うこととした。

3. 研究の方法

(A) 圧縮センシングによる広範囲撮影の検討

広範囲撮影において、圧縮センシングの臨床的診断能を検討するにあたり、脳動静脈奇形を対象とする。脳動静脈奇形は、先天的な動脈と静脈の短絡により動脈の血圧により静脈が異常に拡張し、脳内出血などを来しうる重篤な疾患で、MR angiography を脳全体（広範囲）に、高解像度で撮影する必要があり、撮影時間も長くなる状況である。圧縮センシングを応用して、撮影時間をどこまで短縮をして良いかを検討した後に、広範囲撮影の圧縮センシング併用の高解像度の脳 MR angiography において、正しく病態が評価できるかどうか検討した。

(B) 圧縮センシングによる体動アーチファクトの除去の検討

頸動脈は大動脈弓～頭蓋底まで走行するため、広範囲の撮影が必要である。脳 MR angiography と異なり、頸動脈 MR angiography は、嚥下運動や呼吸、動脈拍動などの生理的な動きによるアーチファクトが生じやすい撮影である。圧縮センシング MRI は、撮影短縮による撮影中の動きの減少が期待されるのみならず、圧縮センシング再構成の繰り返しによるノイズ除去効果も期待される。(A)に引き続き、広範囲撮影+体動によるアーチファクト除去が圧縮センシングによりどこまで可能かを検討した。

(C) 圧縮センシングによる血管壁イメージングの検討

頸動脈血管壁イメージングは、頸動脈壁に生じた粥状動脈硬化を評価するもので、血管内腔を黒くする撮影法である。出血を含んだ状態(図右:矢印)であると不安定プラークが疑われる。(B)と同様に撮影中の生理的な動きによるアーチファクトが生じやすい。(A),(B)とは撮影種類が異なるが、(A),(B)の経験を生かし、圧縮センシングによるノイズ除去効果により血管内の信号を除去し、血管壁の動脈硬化の描出能を検討した。

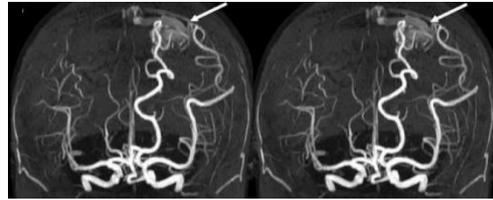
(D) 圧縮センシングによる使用造影剤の減量の検討

(A)-(C)のMRI撮影は造影剤を使用しない(非造影)が、本課題においては、造影剤を使用した複数の時相が撮影可能なMR-DSAを対象とする。「(造影剤が入っていく時相)-(造影剤が入る前の時相)」という差分画像には黒が多く(ゼロが多い)圧縮センシングの良い適応と考えられる。圧縮センシングによる造影剤減量のMR-DSAを検討した。

4. 研究成果

(A) 圧縮センシングによる広範囲撮影の検討

広範囲撮影において、圧縮センシング MR angiography の有用性を示した。(Neuroradiology 2020 にて誌上発表)(図は左が従来撮影、右が圧縮センシング MR angiography)

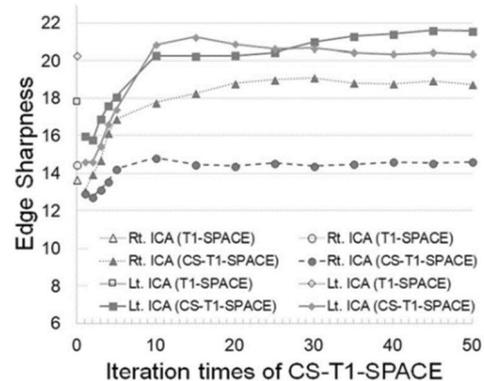


(B) 圧縮センシングによる体動アーチファクトの除去の検討

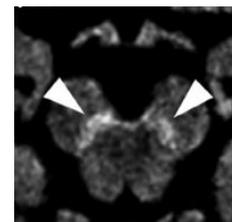
頸動脈 MR angiography においても、圧縮センシング再構成の繰り返しによるノイズ除去効果も期待された。広範囲撮影+体動によるアーチファクト除去が圧縮センシングにより改善することを示した。(RSNA 2019 で学会報告) アーチファクト低減のための繰り返し再構成を追求する際に、磁化率を推定する手法として知られる定量的磁化率マッピングにも繰り返し再構成の手法を適用することを考えた。実際に、定量的磁化率マッピングの画質向上が得られ、短時間撮影においても良好な定量的磁化率マッピングを得ることができたため、Investigative Radiology 2020 にて誌上報告を行った。

(C) 圧縮センシングによる血管壁イメージングの検討

頸動脈血管壁イメージングにおいても、圧縮センシングによるノイズ除去効果により血管内の信号を除去し、血管壁の動脈硬化の描出能が保たれることを示した(European Radiology 2019 にて誌上報告)。繰り返し再構成は 10 回程度で血管壁の明瞭さが保たれており、画像再構成時間の短縮にも繋がる可能性を示した(図右)。

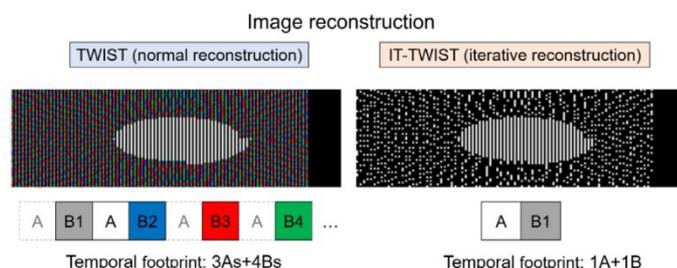


また、この経験を活かし、血管壁イメージングに有用である black-blood imaging を行い、black-blood imaging を用いた撮影が神経メラニン画像にも応用可能であることを見出し(図右) Movement Disorders 2021 にて誌上報告を行った。



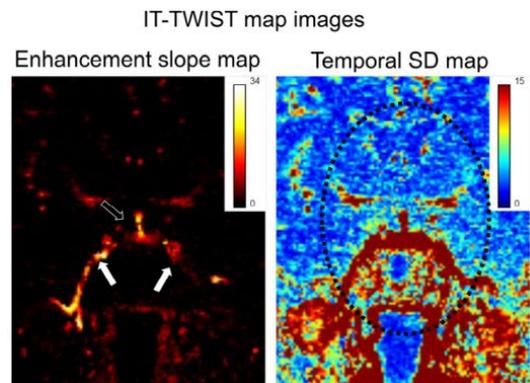
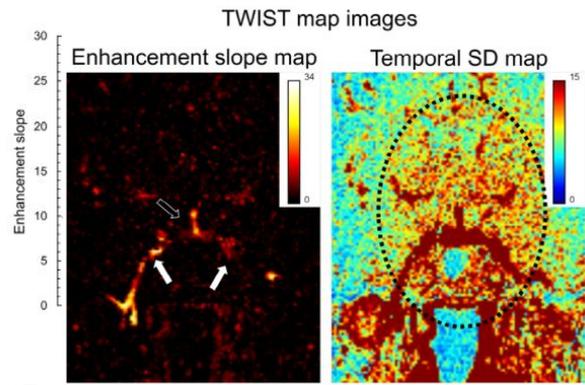
(D) 圧縮センシングによる使用造影剤の減量の検討

造影 MR-DSA において、k-space のサンプリングを各時相でシェアすることにより、間引き収集が可能となるが、時間分解能の観点からは、異なる時相のデータが混じってしまうため、精度の悪い画像となってしまうのが従来の手法であった。本課題では、造影剤減量を主眼におく前に、この時間分解能(Temporal footprint)を改善すべく、他の時相の混じらないデータ・サンプリングにより画像再構成を行い、画質不良分については、繰り返し再構成を行う戦略とした。(図右)



従来法では、B1 の時相の画像再構成を行う際に、B2, B3, B4 の時相のデータも必要であったが、B1 の時相のみのスパースサンプリング状況であっても、圧縮センシングの一つである繰り返し再構成を用いることにより、画像再構成を可能とし、画質としても遜色ないものが取得できた。これを下垂体の Dynamic 撮影に応用して、時間分解能の向上する本手法が実際の臨床評価に耐えうるかを評価した。結果としては、造影効果の立ち上がりについては、従来法と同等かやや向上し、各時相のノイズ低減も得られ、良質な画像を得ることができた。本成果を JMRI 2019 にて誌上報告を行った。

時間分解能を高めた状態で、造影剤を減量した撮影手法においても、データ収集は終了しており、誌上報告に向けて準備を行っているところである。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Oshima S, Fushimi Y, Okada T, Takakura K, Liu C, Yokota Y, Arakawa Y, Sawamoto N, Miyamoto S, Togashi K	4. 巻 294
2. 論文標題 Brain MRI with Quantitative Susceptibility Mapping: Relationship to CT Attenuation Values	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Radiology	6. 最初と最後の頁 600 ~ 609
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1148/radiol.2019182934	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 該当する
1. 著者名 Yokota Y, Okada T, Fushimi Y, Yamamoto A, Nakajima S, Fujimoto K, Oshima S, Koerzdoerfer G, Nittka M, Pfeuffer J, Togashi K	4. 巻 -
2. 論文標題 Acceleration of 2D-MR fingerprinting by reducing the number of echoes with increased in-plane resolution: a volunteer study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MAGMA	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） 10.1007/s10334-020-00842-8	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 該当する
1. 著者名 Fushimi Yasutaka, Nakajima Satoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Editorial for “Quantitative Susceptibility Mapping for Characterization of Intraplaque Hemorrhage and Calcification in Carotid Atherosclerotic Disease”	5. 発行年 2020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.27089	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 Y, Fushimi Y, Okada T, Fujimoto K, Oshima S, Nakajima S, Fujii T, Tanji M, Inagaki N, Miyamoto S, Togashi K	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 2020年
3. 雑誌名 Journal of Magnetic Resonance Imaging	6. 最初と最後の頁 1497-1506
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 Miyakoshi A., Funaki T., Fushimi Y., Kikuchi T., Kataoka H., Yoshida K., Mineharu Y., Takahashi J.C., Miyamoto S.	4. 巻 40
2. 論文標題 Identification of the Bleeding Point in Hemorrhagic Moyamoya Disease Using Fusion Images of Susceptibility-Weighted Imaging and Time-of-Flight MRA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 American Journal of Neuroradiology	6. 最初と最後の頁 1674-1680
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3174/ajnr.A6207	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 Miyakoshi A, Funaki T, Takahashi JC, Takagi Y, Kikuchi T, Yoshida K, Kataoka H, Mineharu Y, Okawa M, Yamao Y, Fushimi Y, Okada T, Togashi K, Miyamoto S	4. 巻 161
2. 論文標題 Restoration of periventricular vasculature after direct bypass for moyamoya disease: intra-individual comparison.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Neurochir (Wien)	6. 最初と最後の頁 947-954
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00701-019-03866-9	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 Okuchi S, Fushimi Y, Okada T, Yamamoto A, Okada T, Kikuchi T, Yoshida K, Miyamoto S, Togashi K	4. 巻 ePub
2. 論文標題 Visualization of carotid vessel wall and atherosclerotic plaque: T1-SPACE vs. compressed sensing T1-SPACE.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Eur Radiol	6. 最初と最後の頁 ePub
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00330-018-5862-8.	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 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 15件)

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

1 . 発表者名	Yasutaka Fushimi, Satoshi Nakajima, Sonoko Oshima, Yusuke Yokota, Sayo Otani, Azusa Ota, John Grinstead, Sinyeob Ahn, Tomohisa Okada, and Kaori Togashi.
2 . 発表標題	The Effect of delay alternating with nutation for tailored excitation (DANTE) pulse on cerebrospinal fluid, brain parenchyma, arteries and veins.
3 . 学会等名	13th Annual Meeting of the American Society of Functional Neuroradiology (国際学会)
4 . 発表年	2019年

1 . 発表者名	Yasutaka Fushimi, Yoshiki Arakawa, Yoichi Shimizu, Kohei Sano, Tomohisa Okada, Sonoko Oshima, Takuya Hinoda, Satoshi Nakajima, Takayoshi Ishimori, Yuji Nakamoto and Kaori Togashi
2 . 発表標題	Grading of Glioma: Comparison between ¹⁸ F-FMISO-PET, Apparent Diffusion Coefficient and Gadolinium Enhancement.
3 . 学会等名	SNMMI 2019 (国際学会)
4 . 発表年	2019年

1 . 発表者名	Yasutaka Fushimi, Tomohisa Okada, Sonoko Oshima, Yusuke Yokota, Hikaru Fukutomi, Gosuke Okubo, Satoshi Nakajima, Akira Yamamoto, Wei Liu, Sinyeob Ahn, Thomas Beck, and Kaori Togashi.
2 . 発表標題	3D T1-weighted Images with Scan Time of Less than 2 Minutes by Using Wave-CAIPI
3 . 学会等名	ISMRM 2019 (国際学会)
4 . 発表年	2019年

1 . 発表者名 Yasutaka Fushimi, Tomohisa Okada, Sonoko Oshima, Yusuke Yokota, Hikaru Fukutomi, Gosuke Okubo, Satoshi Nakajima, Akira Yamamoto, Sunil Patil, Pascal Sati, and Kaori Togashi.
2 . 発表標題 Comparison study of QSM calculated from different image sequences.
3 . 学会等名 ISMRM 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Sonoko Oshima, Yasutaka Fushimi, Tomohisa Okada, Akira Yamamoto, Satoshi Nakajima, Gosuke Okubo, Hikaru Fukutomi, Yusuke Yokota, and Kaori Togashi. Co
2 . 発表標題 Correlation between CT and QSM in the brain.
3 . 学会等名 ISMRM 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Sonoko Oshima, Yasutaka Fushimi, Tomohisa Okada, Akira Yamamoto, Satoshi Nakajima, Gosuke Okubo, Hikaru Fukutomi, Yusuke Yokota, John Grinstead, Sinyeob Ahn, and Kaori Togashi.
2 . 発表標題 Visualization of the Substantia Nigra Pars Compacta: comparison between DANTE T1-SPACE and T1-SPACE.
3 . 学会等名 ISMRM 2019 (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 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Krishna Pandu Wicaksono, Yasutaka Fushimi, Tomohisa Okada, Satoshi Nakajima, Sonoko Oshima, Yusuke Yokota, Azusa Sakurama, Sayo Otani, and Kaori Togashi.
2 . 発表標題 Reliability Study of Quantitative Susceptibility Mapping from Three-Dimensional Echo-Planar Imaging with 2 Minutes Scan Time.
3 . 学会等名 ISMRM 28th 2020 ISMRM & SMRT Virtual Conference & Exhibition. (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Satoshi Nakajima, Yasutaka Fushimi, Yusuke Yokota, Sonoko Oshima, Sayo Otani, Azusa Sakurama, Krishna Pandu Wicaksono, Yuichiro Sano, Ryo Matsuda, Masahito Nambu, Koji Fujimoto, Hitomi Numamoto, Kanae Kawai Miyake, Tsuneo Saga, and Kaori Togashi.
2 . 発表標題 Application of Deep Learning Reconstruction to Compressed-sensing Thin-slice Fat-suppressed T2-weighted Imaging of the Orbit.
3 . 学会等名 ISMRM 28th 2020 ISMRM & SMRT Virtual Conference & Exhibition. (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Satoshi Nakajima, Yasutaka Fushimi, Tomohisa Okada, Gosuke Okubo, Yusuke Yokota, Sonoko Oshima, Sayo Otani, Azusa Sakurama, Krishna Pandu Wicaksono, and Kaori Togashi.
2 . 発表標題 Quiet Diffusion-weighted Imaging in Pediatric Patients with Moyamoya Disease.
3 . 学会等名 ISMRM 28th 2020 ISMRM & SMRT Virtual Conference & Exhibition (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Sonoko Oshima, Yasutaka Fushimi, Satoshi Nakajima, Yusuke Yokota, Sayo Otani, Azusa Sakurama, Krishna Pandu Wicaksono, Yuichiro Sano, Ryo Matsuda, Masahito Nambu, Koji Fujimoto, Hitomi Numamoto, Kanae Kawai Miyake, Tsuneo Saga, and Kaori Togashi.
2 . 発表標題 Evaluation of the Substantia Nigra and Locus Coeruleus by Neuromelanin-Sensitive MR Imaging with Deep Learning Based Noise Reduction.
3 . 学会等名 ISMRM 28th 2020 ISMRM & SMRT Virtual Conference & Exhibition. (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Sayo Otani, Yasutaka Fushimi, Satoshi Nakajima, Yusuke Yokota, Sonoko Oshima, Azusa Sakurama, Krishna Pandu Wicaksono, Yuichiro Sano, Ryo Matusda, Masahito Nambu, Koji Fujimoto, Hitomi Numamoto, Kanae Kawai Miyake, Tsuneo Saga, and Kaori Togashi.
2. 発表標題 Clinical Application of Six-fold Accelerated Submillimeter Whole Brain 3D T2-weighted Imaging with Deep Learning Reconstruction.
3. 学会等名 ISMRM 28th 2020 ISMRM & SMRT Virtual Conference & Exhibition. (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sayo Otani, Yasutaka Fushimi, Satoshi Nakajima, Yusuke Yokota, Sonoko Oshima, Azusa Sakurama, Krishna Pandu Wicaksono, Tomohisa Okada, and Kaori Togashi.
2. 発表標題 The Signal Intensity of Anterior and Posterior Lobe of Pituitary and Thyroid Gland in Preterm and Term Infants.
3. 学会等名 ISMRM 28th 2020 ISMRM & SMRT Virtual Conference & Exhibition (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