

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K17216

研究課題名（和文）非侵襲で低コストな高精度脳機能検査を実現する高解像度fMRIの開発

研究課題名（英文）Development of high-resolution fMRI image processing using deep learning for non-invasive and low-cost high-precision brain functional imaging

研究代表者

大田 淳子 (Ota, Junko)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・QST病院・主任研究員

研究者番号：90825001

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：fMRIは脳機能を可視化するツールとして用いられているが、空間解像度は構造的MRIと比較すると相対的に低い。空間解像度の高いfMRIを撮像するためには、時間分解能の制約があり困難である。また、深層学習などの機械学習法を用いて空間解像度を向上させる方法を用いることができれば、撮像後に空間解像度を向上させることが可能だが、学習の教師となる空間解像度が高い理想的なfMRI画像を準備するのが困難である。本研究課題では、T2*強調画像はfMRIと同様にエコープラナーイメージングにより取得されるため、画像コントラストが類似している点に着目し、新たな高解像度fMRIを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、人工知能を用いた超解像処理により画質が向上するだけでなく、さらに脳機能を局所的に評価できるかどうかを明らかにする点で学術的意義がある。また、新たな撮像装置を導入することなく、脳機能をより精密に評価できるため、汎用性が高く、社会的波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Functional magnetic resonance imaging (fMRI) is utilized as a tool for visualizing brain function, but its spatial resolution is relatively low compared to structural MRI. Achieving high spatial resolution fMRI imaging is challenging due to constraints on temporal resolution. On the other hands, while methods such as deep learning can be used to improve spatial resolution post-imaging, it is difficult to prepare high-resolution ideal fMRI images that serve as the teaching material for learning. In this study, we proposed a new high-resolution fMRI approach by leveraging T2*-weighted images, which are acquired similarly to fMRI through echo-planar imaging, and conducting super-resolution processing using adversarial generative networks trained on T2*-weighted images, exploiting their similar image contrast.

研究分野：放射線科学

キーワード：fMRI 深層学習 超解像

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

機能的 MRI (fMRI) は、脳機能の研究において主要な計測法である。非侵襲的な脳機能計測手法としては、fMRI、PET、近赤外分光法、脳波、脳磁図などがあるが、その中で fMRI は相対的に空間解像度 (以下、解像度) が高いことが特徴である。しかし、fMRI の解像度は一般的な MRI 画像 (T1 強調画像や T2 強調画像など) と比較してはるかに低い。この原因は、十分な時間分解能を得るために、一般的な MRI 画像に比べて、1 スライスあたりの撮像時間を短くする必要があるのである。そのため脳の賦活領域を詳細に弁別することができない。

fMRI の解像度を向上させるために、7T 装置を用いる方法が報告されている [Newton, T. A. et al. Neuroimage 59(1), 2012]。しかし、この方法は導入に莫大な費用を要する点で臨床応用が難しい。また、FOV を狭めることで fMRI の解像度を向上させた報告 [Iranpour, J. et al. PLOS ONE 10(11), 2015] もあるが、この方法では全脳を評価することができない点に問題がある。このように、臨床において高解像度 fMRI を得る方法は十分に確立されていない。

近年、人工知能技術を用いて解像度を向上させる超解像処理が盛んに研究されている。とりわけ申請者らは、ディープラーニングなどの機械学習を用いて画像処理により解像度を向上させる超解像処理が様々な医用画像 (胸部単純 X 線像や胸部 CT、マンモグラフィ、頭部 MRI 画像) を高画質に高解像度化できることを示してきた。超解像処理の導入には新たな機器などの購入の必要がない上、撮像装置に依存しない高解像度化手法であるため、医用画像に対する超解像処理の臨床応用への期待が高まっている。

人工知能を用いた超解像処理は、低解像度な画像と高解像度な画像の対応関係をあらかじめ学習して、その情報を用いる。しかし、fMRI は時間分解能を向上させるために高速撮像法で撮像する必要があるので、通常の臨床用 MRI では教師となる高解像度画像を撮像できない。そこで、T2*強調画像に着目した。T2*強調画像は fMRI とは信号取得方法が異なるため、fMRI とは厳密にはコントラストやノイズ、アーチファクトが同じではないが、T2*減衰を強調した画像である点では類似している。そして、教師用データとなる高解像度画像を、低解像度の場合と同様のコントラストで撮像することが可能である。この特徴を利用し、T2*強調画像を用いて学習させた超解像処理を fMRI に適用すれば、fMRI を高解像度化し、結果として高精度な脳機能マップが得られるのではないかと考え、本研究を企画した。

2. 研究の目的

本研究では、人工知能を用いて非侵襲的かつ高精度な脳機能検査を実現する、高解像度 fMRI を開発することを目的とした。また、ヒトを対象とした撮像により、提案手法により得られた高解像度 fMRI を脳機能解析した際の脳機能の弁別能を評価した。

3. 研究の方法

(1) 高解像度 fMRI の開発 (図 1)

(ア) T2*強調画像を用いた学習モデルの作成

MRI 装置を用いて高解像度 T2*強調画像と低解像度 T2*強調画像を取得する。低解像度画像と高解像度画像の対応関係を敵対的生成ネットワークを用いて学習した。低解像度画像を入力するとそれに対応する高解像度画像 (超解像画像) を出力する学習モデルを作成した。

(イ) 高解像度脳機能マップの作成

作成した学習モデルを fMRI 画像に適用し、高解像度な fMRI 画像を作成した。さらに、高解像度 fMRI 画像から、高解像度脳機能マップを作成した。

(2) ヒトを対象とした提案手法の評価

(ア) ボランティアスタディ (指タッピング)

健康者 30 名を対象とし、賦活時 (指タッピング時) の fMRI 画像を取得した。賦活時の fMRI は、代表的な賦活タスクとして指を一定周期でタッピングさせながら撮像を行った。このとき、特に運動領域の弁別能を評価するため、複数の異なる指 (親指と小指) でタッピングを行った。同時に、学習用の T2*画像を取得した。

(イ) 指タッピング時の脳機能評価

タッピングにより賦活される運動野や補足運動野上の領域がどれだけ高感度・高特異度に抽出できるかを標準脳ベースに評価し、従来法と提案法を比較した。さらに、近接する運動領域の弁別能を、異なる手指を動かしているときの賦活領域がどの程度分離できているかを基準に、従

来法と提案法とで比較した。これらの評価には Dice 係数を指標として用いた。

4. 研究成果

視覚的評価では、提案手法の活性化マップの高相関領域（手指のタッピング運動と BOLD 信号との相関が高いボクセル）が、通常の fMRI 活性化マップと比較して、比較的限られた領域を占めていた（図 2(a)）。

定量的評価では、提案手法から得られた活性化マップの一次運動野領域に含まれる画素数（手指のタッピング運動時の BOLD 信号と相関が高い画素数）は、通常の fMRI から得られた画素数と比較して有意に少なかった。また、2つの指（親指と小指）のタッピング課題に対応する活性化領域について算出された Dice 係数は、提案手法の方が有意に低かった（図 2(b)）。これらの結果は、提案手法が通常の fMRI と比較して機能分解能を向上できる可能性を示唆している。

本研究内容を Scientific reports 誌に投稿し、出版された。

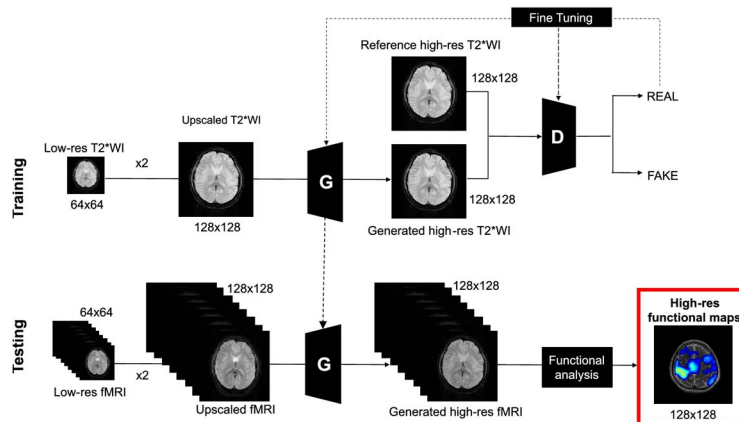


図 1 高解像度 fMRI の概要

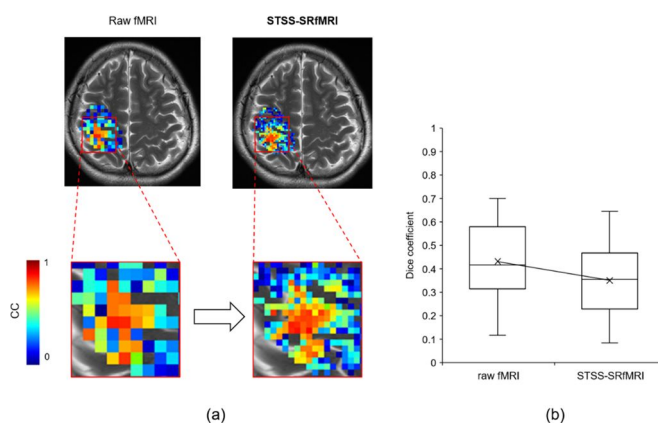


図 2 通常の fMRI と提案手法 (STSS-SRfMRI) を比較した結果。(a) 活性化マップの一例。詳細を示すために、一次運動野で CC 値が最も高い領域を下の挿入図で拡大している。(b) 通常の fMRI と STSS-SRfMRI の Dice 係数の比較。STSS-SRfMRI の方が通常の fMRI よりも有意に小さい Dice 係数が得られた ($p=0.00000276$)。通常の fMRI と STSS-SRfMRI の中央値 (四分位範囲 (IQR)) は、それぞれ 0.417 (0.320-0.575) と 0.355 (0.238-0.457) であった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ota Junko, Umehara Kensuke, Kershaw Jeff, Kishimoto Riwa, Hirano Yoshiyuki, Tachibana Yasuhiko, Ohba Hisateru, Obata Takayuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Super-resolution generative adversarial networks with static T2*WI-based subject-specific learning to improve spatial difference sensitivity in fMRI activation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10319
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-14421-5	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 大田 淳子	4. 巻 36
2. 論文標題 AIを用いた超解像処理とfMRIの高解像度化への期待	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Innervision	6. 最初と最後の頁 12-15
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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Junko Ota, Kensuke Umehara, Yasuhiko Tachibana, Yoshiyuki Hirano, Hisateru Ohba, Takayuki Obata, Tatsuya Higashi
2. 発表標題 Deep-Brain: A Cutting-edge Concept for Outstanding Functional Resolution in fMRI
3. 学会等名 RSNA 2020 106th Scientific Assembly and Annual Meeting（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大田淳子, 立花泰彦, 平野好幸, 梅原健輔, 影山肇, 生駒洋子, 大場久照, 小島隆行
2. 発表標題 ディープラーニングを用いた課題時fMRIの高精度化に向けた初期的検討
3. 学会等名 第47回日本放射線技術学会秋季学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Kageyama, Yasuhiko Tachibana, Junko Ota, Kensuke Umehara, Yoshiyuki Hirano, Takayuki Obata, Keisuke Kondou, Kazuo Shimura
2. 発表標題 Deep learning-based super-resolution for resting state fMRI using network trained by T2*WI (T2*WIを代替訓練データとして安静時fMRIを深層学習により高解像度化する手法の初期的検討)
3. 学会等名 第47回日本磁気共鳴医学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大田淳子
2. 発表標題 指定発言： AIは10年後の臨床現場をどう変えるか (AI研究に従事する立場から)
3. 学会等名 第76回日本放射線技術学会総会学術大会 (招待講演)
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
---------	---------