

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：30108

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K08184

研究課題名（和文）拡散MRI画像を用いた画像ベースの組織定量値推定手法の開発

研究課題名（英文）Development of an image-based estimation method for tissue parameters in diffusion MRI

研究代表者

熊澤 誠志（Kumazawa, Seiji）

北海道科学大学・保健医療学部・教授

研究者番号：50363354

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では拡散MRIが最も応用されている頭部領域を対象として、画像ベースでの拡散MRI画像における新たな幾何学的歪み補正手法を考案した。本手法は形態MRI画像と幾何学的歪みを伴う拡散MRI画像を用いて、MRI画像生成過程のモデルに基づいて磁場不均一分布と組織定量値の交互反復推定を行うものである。提案手法が従来の画像ベース（非剛体レジストレーション）手法と比べ、歪み補正、磁場不均一分布推定が優れていることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

拡散MRI画像では撮像後の画像解析によって組織構造に関する情報が得られ、これらを高解像度のT1強調画像などの形態画像へマッピングし、形態情報と合わせた解析・可視化が行われており、特に拡散情報の解析に基づく脳白質神経線維束の推定は脳神経外科における手術計画等に用いられている。拡散MRI画像解析の前処理として本手法を用いることで、形態情報と合わせた解析・可視化や脳白質神経線維束の推定などの精度向上が期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to develop a method for joint estimation of the undistorted image and the magnetic field inhomogeneity map in distorted brain diffusion MRI images. Our proposed method estimates the undistorted image in the image domain based on MR imaging physics, while simultaneously estimating the magnetic field inhomogeneity alternatively using the conjugate gradient method. Results demonstrate that our method can outperform a non-rigid registration-based distortion correction method.

研究分野：医用画像

キーワード：拡散MRI EPI 磁場不均一 幾何学的歪

## 1. 研究開始当初の背景

拡散 MRI 画像では撮像後の画像解析によって組織構造に関する情報が得られ、これらを高解像度の T1 強調画像などの形態画像へマッピングし、形態情報と合わせた解析・可視化が行われている。この拡散 MRI では、被写体内の磁場不均一によって幾何学的な画像歪みが生じることが問題となっている[1]。被写体内の磁場不均一は、磁化率が異なる空気と組織境界付近で顕著であるため、頭部においては副鼻腔周辺で画像歪みが生じる。拡散 MRI においてこの画像歪みは、T1 強調画像などの形態画像とレジストレーションする際にミスレジストレーションの原因となる。また副鼻腔周辺では歪みにより組織構造情報の描出が困難となり、疾患評価が困難となっている[2]。このため推定された磁場不均一分布に基づいて、画像歪み補正が行われている。

被写体内の磁場不均一分布推定に関する先行研究としては、エコー時間の異なるグラディエントエコー法で撮像された二つの画像から位相画像を作成し、位相画像から磁場不均一分布を推定する手法(フィールドマップ法)がある[3]。位相画像から磁場不均一分布を推定するには位相折り返し除去(phase unwrapping)処理が必要であるが、これに関する決定的な手法はない[4,5]。またフィールドマップ法では、位相画像取得のための追加撮像が必要となり、被験者の動きによる拡散 MRI 画像と位相画像撮像間の位置ずれが問題となる[5]。

画像ベースでの画像歪み補正に関する先行研究としては、T1 強調画像などの形態画像と拡散 MRI 画像との非剛体レジストレーションを行い、磁場不均一分布推定と画像歪み補正を行う手法が提案されている[6]。フィールドマップ法と比較した補正性能の評価では、非剛体レジストレーション手法のほうが優れているとの報告[7]もあるが、十分な補正性能ではないとの報告もある[8]。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、拡散 MRI が最も応用されている頭部領域を対象として、画像ベースでの拡散 MRI 画像における新たな幾何学的歪み補正手法を開発することである。具体的には、形態 MRI 画像と幾何学的歪みを伴う拡散 MRI 画像を用いて、MRI 画像生成過程のモデルに基づいて磁場不均一分布と組織定量値の交互反復推定を通して、歪無し画像を推定する手法を開発することである。

## 3. 研究の方法

本研究で考案した手法の基本的な考え方は、拡散 MRI 画像の座標空間において T1 強調画像から得られた解剖情報をもとに拡散 MRI 画像をシミュレートし、実測の拡散 MRI 画像と一致するように歪んだ拡散 MRI 画像を再現することである。

### (1) 推定手法の概要

拡散 MRI の撮像に用いられているシングルショット型 Echo-planar imaging での k 空間の信号充填をモデル化し、T1 強調画像から得られた解剖情報、組織定量値および磁場不均一分布を用いて拡散 MRI 画像をシミュレートし、実測の拡散 MRI 画像との二乗平均平方根誤差を評価するアルゴリズムを考案した。組織定量値と磁場不均一分布の初期値から評価関数を最小化することで、これらの推定を行うものである。評価関数の最小化には、本研究で新たに考案した解剖学的正則化項に基づく共役勾配法を用いた。

### (2) 拡散 MRI データ

提案手法の性能を評価するにあたって、シミュレーションデータと実際のデータを用いた。拡散 MRI 画像のシミュレーションデータは Brainweb(<http://www.bic.mni.mcgill.ca/brainweb/>) で提供されているデジタルファントム[9]を用いて Susceptibility-Voxel Convolution(SVC)法[10]によりデジタルファントム内の磁場分布を計算し、シングルショット EPI での k 空間信号充填に基づいた MR 信号の式を用い[11]、 $b$  値=0 sec/mm<sup>2</sup>としてシミュレートした。また実際の拡散 MRI データとして、公開データベースである IXI dataset[12]から 12 例、Human Connectome Project[13]から 5 例を用いた。

### (3) 手法の評価

シミュレーションデータを用いた磁場不均一分布推定では、SVC 法によって計算した磁場不均一分布を真の分布とし、真の分布と推定分布の正規化二乗平均平方根誤差(NRMSE)を用いて評価した。また画像歪み補正では補正画像と T1 強調画像間の相互情報量(MI)を用いた。提案手法との比較評価には、非剛体レジストレーション法である BrainSuite[14]を用いた。

4. 研究成果

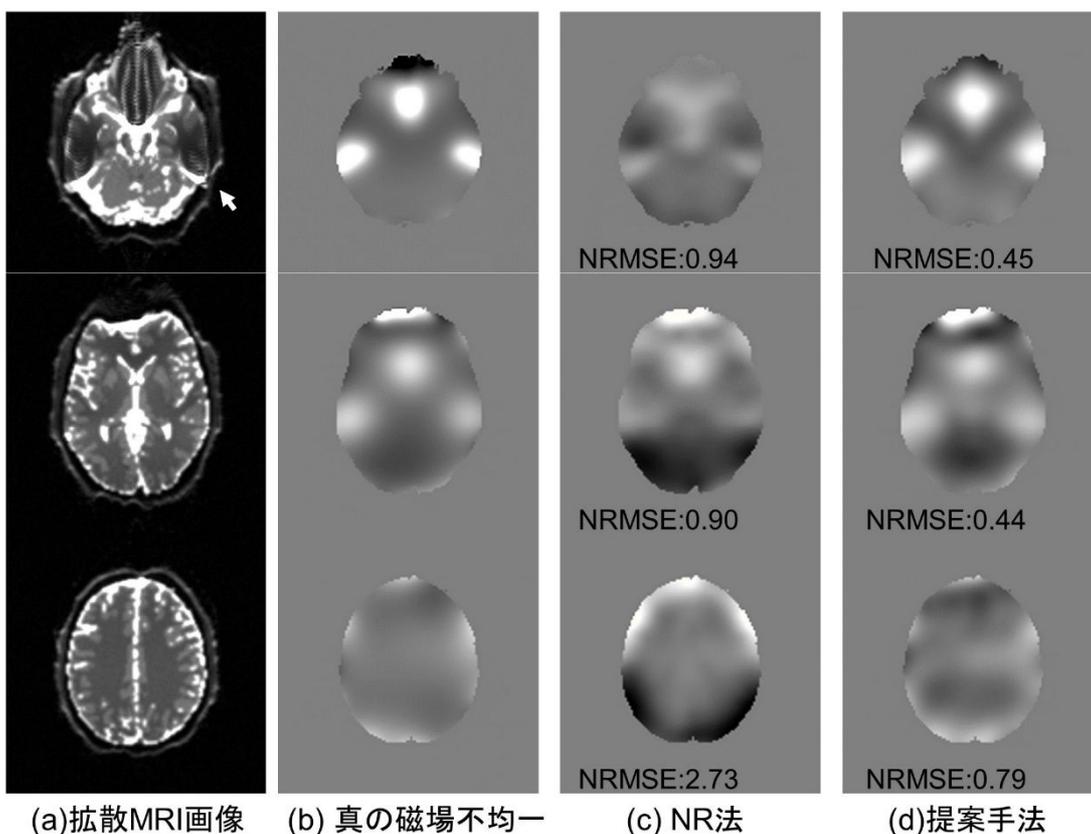


図 1 シミュレーションデータでの磁場不均一分布推定

図 1 にシミュレーションデータを用いた磁場不均一分布推定結果を示す．(b)に SVC 法によって計算した真の磁場不均一分布，(c)に非剛体レジストレーション (NR) 法，(d)には提案手法による推定結果をそれぞれ示す．提案手法が非剛体レジストレーション法に比べ，NRMSE が低く，良好に磁場不均一分布を推定できたことを示している．

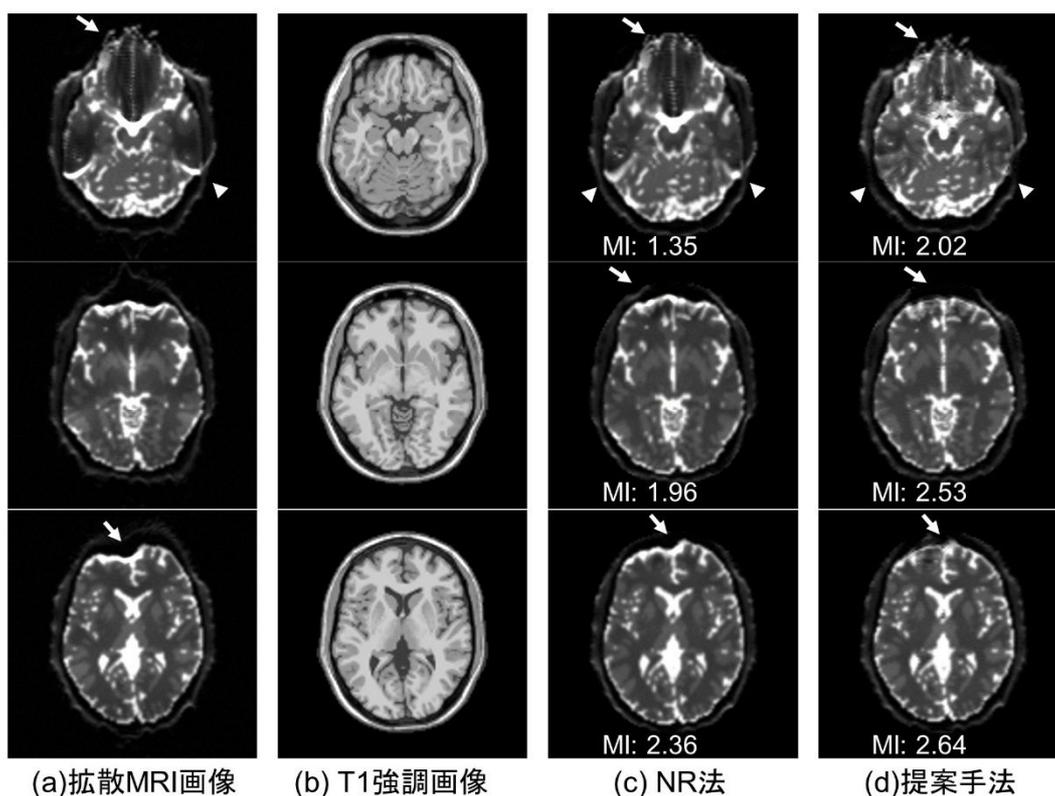
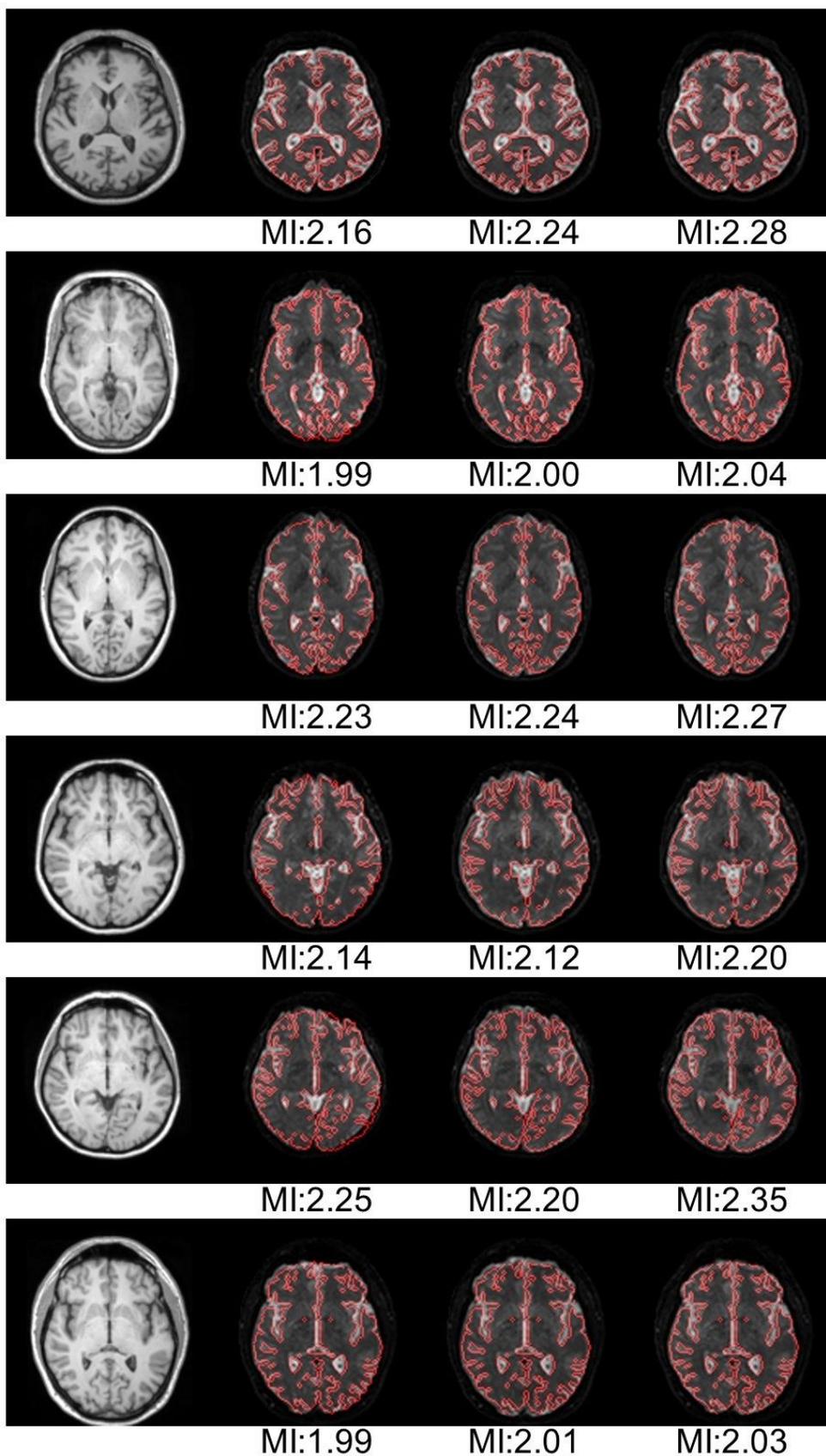


図 2 シミュレーションデータでの画像歪み補正

図2にシミュレーションデータを用いた画像歪み補正結果を示す．(b)にT1強調画像，(c)に非剛体レジストレーション(NR)法，(d)には提案手法による歪み補正結果をそれぞれ示す．提案手法が非剛体レジストレーション法に比べ，MIが高く，良好に画像歪み補正ができたことを示している．



(a)T1強調画像 (b)拡散MRI画像 (c) NR法 (d)提案手法

図3 IXIデータでの画像歪み補正結果

図 3 に公開データベースである IXI dataset を用いた画像歪み補正結果を示す。(a)に T1 強調画像, (b)に補正前の拡散 MRI 画像, (c)に非剛体レジストレーション (NR) 法, (d)には提案手法による歪み補正結果をそれぞれ示す。(b)-(d)の赤線は白質と灰白質の境界線を示す。図 2 のシミュレーションでの結果と同様, 提案手法が非剛体レジストレーション法に比べ, MI が高く, 良好に画像歪み補正ができたことを示している。画像ベースの従来手法である非剛体レジストレーション手法と比較し, 本研究で開発した手法が優れていることを示した。

拡散 MRI 画像では撮像後の画像解析によって組織構造に関する情報が得られ, これらを高解像度の T1 強調画像などの形態画像へマッピングし, 形態情報と合わせた解析・可視化が行われており, 特に拡散情報の解析に基づく脳白質神経線維束の推定は脳神経外科における手術計画等に用いられている。これらの結果から拡散 MRI 画像解析の前処理として本手法を用いることで, 形態情報と合わせた解析・可視化や脳白質神経線維束の推定などの精度向上が期待される。

#### < 引用文献 >

- [1] Farzaneh F, et al., Magn. Reson. Med. 14, 123-139 (1990).
- [2] Yoshiura T, et al., Magn. Reson. Med. 54, 455-459 (2005).
- [3] Jezzard P, et al., Magn Reson Med. 34, 65-73 (1995).
- [4] Cusack R, et al., Neuroimage. 16, 754-764 (2002).
- [5] Hutton C, et al., Neuroimage. 16, 217-240 (2002).
- [6] Studholme C, et al., IEEE Trans Med Imaging. 19, 1115-1127 (2000).
- [7] Wang S, et al., Front Neuroinform. 11, 2017. doi: 10.3389/fninf.2017.00017.
- [8] Graham MS, et al., PLoS One. 2017;12(10):e0185647.
- [9] Collins DL, et al., IEEE Trans Med Imaging.17, 463-468 (1998).
- [10] Yoder DA, et al., Magn Reson Imaging. 22, 315-328 (2004).
- [11] Kumazawa S, et al., J Neuroradiol, 42, 150-155 (2015).
- [12] <https://brain-development.org/ixi-dataset/>
- [13]<https://www.humanconnectome.org/study/hcp-young-adult/document/1200-subjects-data-release>
- [14] Bhushan C, et al., Signal Inf Process Assoc Annu Summit Conf APSIPA Asia Pac. 2012;1-9.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 Seiji Kumazawa, Takashi Yoshiura	4. 巻 49
2. 論文標題 Estimation of undistorted images in brain echo-planar images with distortions using the conjugate gradient method with anatomical regularization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Medical Physics	6. 最初と最後の頁 7531-7544
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/mp.15881	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 熊澤誠志 吉浦敬
2. 発表標題 頭部EPI画像におけるT1強調画像を用いた磁場不均一分布推定手法の比較
3. 学会等名 第50回日本磁気共鳴医学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊澤誠志 吉浦敬
2. 発表標題 頭部EPI画像における歪補正画像と変位マップの結合推定
3. 学会等名 第49回日本磁気共鳴医学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊澤誠志, 吉浦敬
2. 発表標題 頭部EPI画像における画像ベース歪み補正手法の比較 - シミュレーションによる検討
3. 学会等名 第48回日本磁気共鳴医学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊澤誠志, 吉浦敬
2. 発表標題 共役勾配法を用いた頭部EPI画像における幾何学的歪み補正手法の開発
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

〔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
研究分担者	吉浦 敬  (Yoshiura Takashi)  (40322747)	鹿児島大学・医歯学域医学系・教授    (17701)	

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
---------	---------