

論文の内容の要旨

論文題目

非直交周波数空間収集による高分解能拡散テンソル収集法の開発と拡散トラクトグラフィへの応用

指導教員： 大友 邦
専攻： 生体物理医学
入進学年： 平成16年
学生氏名： 椋沢 宏之

要旨

本論文は4章からなる。第1章は、本論文の序を成しており現状の拡散テンソル撮像法の問題点の指摘と解決すべき問題を提示した。現在、拡散テンソル画像撮像には、1回の励起で画像撮像を収集する single shot Echo Planar Imaging (SS-EPI)法を用いた手法が用いられている。SS-EPI法では、被験者の動きに影響を受けず、安定した撮像を行うことが出来るが、一方で、磁化率不均一の影響を受け、画像歪みと空間分解能の制限を受ける。拡散強調画像撮像の高分解能化をおこなうには、Multi-shot でデータを取得する必要がある、体動によるショット間の位相変化の問題を解決する必要があることを述べた。この問題を解決するために、非直交周波数空間上でのデータサンプリング手法である、radical scan法と PROPELLER (periodically rotated overlapping parallel lines with enhanced reconstruction)法を用いた拡散強調画像および拡散テンソル画像撮像法が有効である可能性を述べた。また、高磁場MRIを使用することにより高い信号雑音比による高分解能の高い画質が期待されることを述べた。一方で磁化率効果およびSAR(specific absorption rate)が増加することによる不利益も予想されることを述べた。

第 2 章は、第 1 章で提示された問題点を検証するための方法論が記述されている。拡散強調像撮像における体動による画像データの位相変化の影響を回避する方法として、投影データを用いる radial scan 法と PROPELLER 法を使用した拡散テンソル撮像法を開発し、特性の評価を行った。View ordering および運動検出磁場勾配の印加方法を比較検討し、最適化を行った。また、PROPELLER 法による拡散テンソル法を 3T 装置の実装し、高磁場装置における問題、とくに SAR に起因する撮像制限について検討した。空間分解能および画像歪みの検証には、ファントムを用いて定量的に解析を行った。正常ボランティアに PROPELLER 拡散テンソル法を適用し、高空間分解能撮像の一例として、脳神経の描出能のについて従来法の EPI 法との比較検討を行った。また、高磁場における問題点を緩和するため、VERSE 法を PROPELLER 法に実装し、その効果を検討した。

第 3 章では、第 2 章で示された実験方法の結果を示している。radial scan 法では動きの少ない正常被験者においては、これまでにない高空間分解能の拡散強調画像を得ることが可能であった。Spin Echo 法をベースとしているため高分解能撮像を行うため projection 方向を 256 マトリクスでの撮像にて繰り返し時間が 2 秒程度である場合には、撮像時間はおよそ 8 分程度となり、比較的長い時間を要し、撮像の高速化が必要と考えられた。

PROPELLER 法のファントムによる基本画質の検討においては、EPI 法の収集マトリクスが 128, 256 に関らず、EPI 法と T2 強調画像の間の歪みは、PROPELLER 法と T2 強調画像の歪みに比べて、有意差 ($P=0.003$, $P=0.006$) をもって大きな値となっており、通常画像に歪みが生じていないと考えられる T2 強調画像を基準としたときには、EPI 法による画像は歪んでいることが示唆された。また、PROPELLER 法と T2 強調画像ではファントムで計測された、半値幅に有意差は無い ($P=0.07$) が、EPI 法は EPI 法の収集マトリクスが 128, 256 に関らず有意差をもって ($P<0.001$) 大きな値となっており、EPI 法は空間分解能が T2 強調画像に比較して劣化していることが示唆された。

高磁場 MRI での PROPELLER 法を用いた拡散テンソルトラクトグラフィ (DTT) の検討を行い、PROPELLER-DTT 法を用いた脳神経のトラッキングは、EPI 法を用いたそれに比べて、優れていることが示唆された。DT-EPI 法では著しい信号消失が磁化率不均一の影響を受けやすい頭蓋底のテント下領域で確認された。一方で、PROPELLER 法では、磁化率効果による信号消失の影響は見られなかった。これらの結果は、PROPELLER 法がテント下の頭蓋底領域における詳細な脳神経構造の画像化のための有用なツールであることを示している。

一方で RF パルスを多用する 3T-PROPELLER 法の SAR の制限を緩和するための最適化について述べた。VERSE 法との組み合わせにより、SAR を従来法の 1/2 程度まで低下させることが可能であることを示した。

第 4 章は、第 3 章の結果に対する考察である。PROPELLER 法は 2 次元面内の位相変化を検出し補正をおこなうため、高空間分解能の拡散強調画像を Multi-shot EPI 法や radial scan 法と比較して、より安定して収集することが可能であった。

脈波同期等の体動検出手段を用いることなく、補正が可能なことも利点であった。また、従来の EPI 法では磁化率不均一の影響が強く撮像が困難であった、頭蓋底、後頭蓋窩、上部頸髄の拡散画像を歪みなく撮像をおこなうことが可能であった。歪みに関しては、PROPELLER 法が優れていたが、画質においてはテント上の構造では EPI 法が優れていた。これは、single shot の EPI 法が MRI の撮像法の中では SNR に優れる撮像法であり、EPI と比較すると PROPELLER 法は SNR が低下しているためと考えられた。SNR に制限があるため、スライス厚は比較的厚く（5mm 程度）設定されるため、拡散テンソル画像では部分容積効果により脳神経などの詳細な構造を三次元的に追跡することは困難であった。

また、従来、拡散テンソル画像撮像法では、EPI 法を使用しており、磁化率不均一の影響を受けやすい頭蓋底領域の撮像は困難であった。PROPELLER 法をしようすることで、磁化率不均一の影響の少ない拡散テンソル画像および拡散テンソルトラクトグラフィーを実施することが可能となった。また、PROPELLER 法による拡散強調画像撮像は、EPI 法に比較して SNR が低いが、高磁場 MRI 装置（3T MRI）を使用することにより、SNR を向上させることが可能となった。PROPELLER 法では、長い RF パルス列を使用し、リフォーカスパルスのフリップ角が 180 度に制限されるため、SAR が高い。VERSE 法を PROPELLER 法に組み込むことにより、撮像条件を大きく変更することなく SAR を 1/2 以下と大幅に削減することが可能となった。これにより、撮像時間を短縮し、撮像範囲を拡大することが可能となった。これらの開発により、現実的な時間内にて十分な SNR を持った画像が 3T においても収集が可能となった。

高磁場 MRI 装置において PROPELLER 法を適用することにより、高空間分解能の拡散テンソル画像を収集し拡散テンソルトラクトグラフィーを作成することが可能となった。従来は収集困難であった頭蓋底領域においても、拡散強調像を収集することが可能となり、三叉神経、聴神経のトラクトグラフィーを作成することが可能となった。