

氏名	五月女 康作		
学位の種類	博士（医学）		
学位記番号	博甲第 8262 号		
学位授与年月	平成 29 年 3 月 24 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審査研究科	人間総合科学研究科		
学位論文題目	PROPELLER 法の動き補正機能検証のためのヒト脳と同じ コントラストと形状を示す新しい MRI ファントムの開発		
主査	筑波大学教授	博士（医学）	南 学
副査	筑波大学教授	工学博士	榮 武二
副査	筑波大学准教授	博士（医学）	石井 一弘
副査	筑波大学教授	博士（医学）	磯辺 智範

論文の内容の要旨

五月女康作氏の博士学位論文は、PROPELLER 法の動き補正機能を検証するため、ヒト脳と同じコントラストと形状を示す新しい MRI ファントムを開発したものである。その要旨は以下の通りである。

（目的）

Magnetic Resonance Imaging (MRI) は、人体からの信号の読み取りに一定の時間がかかるため、動きに弱い検査として知られている。Periodically Rotated Overlapping Parallel Lines with Enhanced Reconstruction (PROPELLER) 法は、特殊なデータ収集方法と動き補正機能を有し、動きに強い撮像方法として 10 年ほど前に開発され、特に頭部領域におけるその効果は絶大で、現在も改良がくわえられている。

しかし PROPELLER 法の動きに対する臨床有用性を検証するには、従来のようなヒト頭部を動かして撮像する in vivo 実験では動きのアーチファクトを十分に再現できないため、MR 画像上で頭部のコントラストと形状を模擬できる精巧なファントムの開発が必要が待たれていた。

著者は、三次元ラピッドプロトタイプング技術を使って、ヒト頭部 MRI と同等なコントラストと形状を示すことができる MRI ファントムを新たに開発した。さらに、そのファントムを任意の角度で回転させることができる駆動システムを作製し、PROPELLER 法に用いられる動き補正機能の角度依存性と頻度依存性を検証している。

（方法）

（1）ファントム作成とファントム MRI 画質評価

著者は、頭部 MRI 画像のグラデーションが、部分容積効果を利用して微細な傾斜で再現することができる点から、MRI 画像の信号強度を傾斜が成す凹凸に変換してヒト頭部 MRI を再現できるのではないかと着想した。そこで被験者 1 名（36 歳、女性）の頭部軸位断 T2 強調画像(T2WI)を 3.0T MRI を用いて撮像し、基底核を含む断層像をファントム作成に参照するヒト T2WI とした。

次いで、そのヒト T2WI の各ボクセルの信号強度を、三次元ラピッドプロトタイピングで成形する凹凸の積層厚に変換する計算式を算出した。変換されたデータを三次元プリンタに入力し、合成樹脂で成形し、その凹凸部に T1, T2 緩和時間を脳脊髄液に合わせたアガロースゲルを流し込み冷却した。

そのファントムをヒト T2WI と同じ撮像条件で、スライス面がファントム凹凸部に一致するようにプランニングし撮像した。そしてヒト T2WI とファントム T2WI の位置補正を行ったのち、2 画像の信号強度の Pearson の相関係数を算出している。

(2) 駆動システムの作製と精度検証

次に著者は、ファントムを任意の角度に回転することができる駆動システムを非磁性体の回転盤、支持盤、24 個のボールベアリングを用いて作製した。ファントムを回転盤に載せ、まず回転盤を 0 度の目盛りの位置に合わせて T2WI を撮像し、次に 60 度回転後に再度撮像したのち、画像上で脳の正中線の回転角度を計測した。同様の撮像を 10 回行い、回転精度に関する平均値と標準偏差を算出している。

(3) PROPELLER 法の動き補正機能検証実験

(ア) 回転角度依存性の検証：PROPELLER 法撮像中に、回転盤を 0 度から α 度に 1 回回転させたときの動き補正画像を取得した (α を変えて計 13 回撮像)。動かすタイミングは 9 番目の repetition time (TR) 内の不活時間とした。そして静止画像 (回転角度 0 度) と各回転画像の相関係数を算出している。

(イ) 回転頻度依存性の検証：PROPELLER 法撮像中に、回転盤を 0→30 度、または 30→0 度に動かす 2 極運動を β 回行ったときの動き補正画像を取得した (β を変えて計 19 回撮像)。動かすタイミングは各 TR 内の勾配磁場印加時間とした。そして静止画像と各回転画像の相関係数を算出している。

(結果)

(1) ファントム MRI

ファントムの成形に要した時間は約 6 時間であった。ヒト T2WI とファントム T2WI は視覚的に酷似し、2 画像の信号強度の相関係数は高い値 [=0.955 ($p < .001$)] を示した。

(2) 駆動システム

駆動システムの回転精度は、平均±標準偏差 = 59.7 ± 0.28 度であり、設定値の 60 度に対して高い精度を示した。

(3) PROPELLER 法の動き補正機能検証実験

(ア) 回転角度依存性の検証：各回転角度の相関係数は一貫して高い値を示したが、回転角度 α が大きくなるにつれてわずかに減少していった (1.000 → 0.957)。

(イ) 回転頻度依存性の検証：各回転頻度 (0-18 回) の相関係数は回転頻度 β が増えるにつれて徐々に減少していった (1.000 → 0.739)。

(考察)

著者は、部分容積効果を利用して、ヒト頭部 MRI と同等なコントラストと形状を示す画像を取得することができるファントムを開発し、その作成法は、画像の信号強度を相対積層厚に変換し、三次元ラピッドプロトタイピング技術で成形するという点でユニークであるとしている。

また、駆動システムと組み合わせて行った 2 つの検証実験では、PROPELLER 法の動き補正機能の回転角度および頻度依存性を、相関係数を用いて定量化することにも成功している。

以上の実験より、本ファントムと駆動システムを用いることで、今まで *in vivo* 実験では行うことができなかった疑似臨床画像を用いた体系的な実験環境で補正機能の定量評価を行える可能性を示したとしている。そして補正機能のアルゴリズム開発に信頼できる新しい評価値を与えることで、さらに動きに強い手法の創出へと繋げることができると考えている。

(結論)

著者は、PROPELLER 法に用いられる動き補正機能を検証するための、ヒト頭部 MRI と同じコントラストと形状を示すことができる新たな MRI ファントムの開発に成功した。それにより、PROPELLER 法の動き補正機能の更なる改良が期待され、頭部の動きによって撮像が困難とされ

てきた様々な患者の画像診断のための新しい研究に寄与できる可能性を示した。

審査の結果の要旨

(批評)

著者が開発したヒト頭部 MRI と同じコントラストと形状を示すことができる新しい MRI ファントムは、断層画像のアーチファクトである部分容積効果を逆手に取ったものでその発想が斬新であるとともに、その作成に三次元ラピッドプロトタイピング技術を用いたことも新奇性に富む。このファントムの作成原理は、PROPELLER 法の動き補正機能の更なる改良のためのみならず、他の MR 撮像シーケンスや CT にも応用が可能な技術であり、医用画像の新たな画質評価法に発展するものである。

平成 29 年 1 月 10 日、学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもと論文について説明を求め、関連事項について質疑応答を行い、最終試験を行った。その結果、審査委員全員が合格と判定した。

よって、著者は博士（医学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認める。