

氏名	ヤマ グチ コウジロウ 山口 弘次郎
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	論博第277号
学位授与の日付	平成24年3月16日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当 論文博士
学位論文題目	MRI用RFパルス関数の設計と循環器領域の動態解析への応用に関する研究
論文審査委員	主査 教授 鵜飼 裕之 教授 岩田 彰 教授 松本 健郎 教授 本谷 秀堅

論文内容の要旨

MRI(Magnetic Resonance Imaging)は、核磁気共鳴現象(Nuclear Magnetic Resonance)を画像化する医療機器であり、人体の構成分子で最も存在比が高い水素原子核(プロトン)からの信号を利用して画像化を行うので、放射線を使用することなく画像診断ができるのと同時に放射線医療機器での短所であった疾患部位に則した撮像断面の設定ができる。

臨床現場がMRIの縦緩和強調画像(T1W)に要求する画質は、繰り返し時間(TR)/エコー時間(TE)を短時間で薄いスライス厚で広範囲を高コントラスト分解能で軟部組織を描出することである。これによるMRIの特有な問題として、RFパルスである電磁波を人体に印加する回数が増えることで最大許容パワー(Watt)の上昇による軟部組織コントラスト低下問題と、TEを短縮することでRFパルス形状の $\pm\pi$ 数低減による周波数特性・スライスプロファイル形状の劣化問題がある。また、T1Wでは脂肪組織の信号が高信号となり画像診断の障害となるので脂肪信号のみを抑制する必要があるため、脂肪抑制RFパルスの周波数領域を狭帯域化する必要があり脂肪抑制RFパルスの印加時間が延長し撮像条件に制限が生じる問題がある。

循環器領域での心・血管系の複雑な走行を描出できる MRI は、撮像断面設定に制約がないことから心筋壁運動解析に適した左室垂直長軸断面・短軸断面での壁運動解析ができる。しかし、MRI でも局所に限局した心筋壁運動解析ができないので心筋の動きを評価する方法として、心筋に tag(荷札)用 RF パルス印加することで心筋壁運動解析が可能となるが、心筋の複雑な運動解析を行うことができない問題がある。また、大動脈血流に tag を印加し大動脈血流形態評価を心時相毎に評価を行うことができるが、tag 用 RF パルス印加タイミングにより血流速が早い場合に tag 形状が血流速に応じて乱れるので正確に血流動態を評価できない問題が生じる。

そこで、本論文では、これらの問題点を解決するために、MRI 用 RF パルスの形状、印加方法および機能評価用の RF パルス印加タイミングの工学的手法を提案することで撮像条件の緩和を実現する。さらに、本論文の手法を用いて得られた医用画像に対してデジタル画像処理技術および臨床疾患での処理評価を適応した動態解析手法を提案する。

本論文で得られた成果は以下の通りである。

第 2 章では、MRI 用 RF 波パルスの $\pm\pi$ 数を維持しながら周波数特性の面積を増大させると共にスライスプロファイル形状の矩形化を実現できる original 関数型 RF パルスの設計を提案している。Original 関数型 RF パルスは、人体に印加する最大許容パワー(Watt)を低減し軟部組織コントラストの改善ができることを臨床実機に original 関数型 RF パルスを搭載して撮像を行った頭部画質評価でも軟部組織コントラストの改善ができることを述べている。

第 3 章では、脂肪抑制 RF パルスは周波数領域を狭帯域化にするために RF パルス印加時間が長くなる問題点を sinc 関数、Laguerre 関数および指数関数を用いた短時間印加型脂肪抑制 RF パルスを試作して脂肪抑制 RF パルスの印加時間の短縮を行っている。臨床実機への搭載による頭部画質評価で短時間印加型脂肪抑制 RF パルスの脂肪抑制効果が有効であることを述べている。

第 4 章では、心臓心筋で複雑な動きを示す右心室と左心室を分けている心室中隔そのものを切断する断面の心室中隔の局所壁運動解析を行うために、tag 用 RF パルスで心室中隔断面に格子状に tag を印加して、心室中隔壁運動を垂直ひずみとせん断ひずみをデジタル画像処理を用いて解析する手法で、正常者および臨床心疾患の垂直・せん断ひずみ評価手法を提案している。

第 5 章では、下行大動脈の血流動態解析を可能にした多時相 tagging 型 RF パルスの開発を行い、流水ファントム実験を通して流速計測方法の有効性を示したのち、正常者および臨床疾患の下行大動脈の血流動態解析する手法を提案している。

第 6 章では本論文により得られた成果を纏めるとともに、MRI 用 RF パルス関数の設計と MRI で循環器領域での心・血管系動態評価を適応する上での課題と展望について述べている。

論文審査結果の要旨

MRI(Magnetic Resonance Imaging)は、核磁気共鳴現象(Nuclear Magnetic Resonance)を画像化する機器であり、現在、医療診断には欠かせない医療機器となっている。MRIは人体の構成分子で最も存在比が高い水素原子核からの信号を利用して画像化を行うことから、放射線を使用することなく画像診断ができるのと同時に、放射線医療機器での短所であった疾患部位に即した撮像断面の設定ができ、撮像断面の制約がないことから心・血管系の複雑な走行も描出することが可能である。また同時に放射線医療機器で描出が難しい心臓心筋等の描出も可能である。とくに、撮像で使用されるRF(Radio Frequency)波の印加方法によっては、心臓心筋にtag(荷札)標識を画像上に示すことで局所心筋機能評価を行うことが可能である点が注目されていることから、医療現場ではRF波の設計・印加方法における開発研究に期待を寄せる声が多い。一方、MRI撮像原理で使用される電磁波であるRF波による吸収電力は人体に与える影響を考慮し規制値を設定しているが、撮像条件により規制値以上の吸収電力が加わることが起こることから撮像条件を満たしながら吸収電力を規制値以下にすることは喫緊の課題となっている。具体的な課題は以下の通りである。

第一にMRIで使用されるRF波はプロトンを励起するために使用されるが、この励起過程が極めて重要である。RF波の形状を短縮するとスライスプロファイル形状の形状に劣化が生じることから、劣化が生じないRF波の形状関数が必要である。第二に脂肪抑制RF波では脂肪信号のみを抑制するので周波数領域での狭帯域化が必要となりRF波の印加時間が非常に長くなるので撮像条件に制約が生じる。このため、制約が生じないRF波の印加時間を短縮できる脂肪抑制RF波の形状関数が必要である。第三に心・循環器領域では放射線医療機器では描出が非常に難しい領域であり、とくに、心・循環領域での局所壁運動解析や下降大動脈血流速の形態評価などはMRIのRF波の印加タイミング方法を正確に印加して評価する必要がある。このように、MRIではRF波の形状、印加方法および印加タイミング等に多くの問題点や課題が残されている。

そこで、本論文では、これらの問題点を解決するために、MRIのRF波の形状、印加方法および機能評価用のRF波印加タイミングなどの問題に対して、工学的手法を提案することで撮像条件の緩和を実現している。さらに、本論文の手法を用いて得られた医用画像に対してデジタル画像処理技術および臨床疾患での処理評価を適用した動態解析手法を提案している。本論文で得られた成果は以下の通りである。

第2章では、MRI用RF波の形状を維持しながら周波数特性の改善とスライスプロファイル形状の矩形化を実現するとともに、RF波の吸収電力を低減できるoriginal関数型RFパルスの設計法を提案している。そして、実機臨床にて撮像を伴った画質評価を行い、提案手法によって設計したRFパルスが従来に比べ優れた画質を実現することを明らかにした。

第3章では、脂肪抑制RFパルスが周波数領域を狭帯域化にするためにRFパルス印加時間が長くなる問題に対して、sinc関数、Laguerre関数および指数関数を用いた短時間印加型脂肪抑制RFパルスを提案している。そして、臨床実機での健常者頭部撮像から、短時間印加型脂肪抑制RFパルスが臨床実機抑制RFパルスと同等の脂肪抑制効果と脂肪以外の信号の低下がないことを確認した。

第4章では、心室中隔断面での局所壁運動解析を行うために心室中隔断面に格子状にtagを印加し垂直・せん断ひずみ計測を可能にするRFパルス印加タイミング法を提案している。具体的には、心筋に無信号のtagを格子状に印加するDANTE-tagging型RFパルスを使用した心筋局所壁運動解析方法を用いて心筋での動きが複雑な断面として心室中隔断面でのひずみ解析方法を提案し、臨床実機での心疾患患者への評価を行うことで、心室中隔断面の心筋壁収縮動態の詳細を解析できるとの結論を得ている。

第5章では、下行大動脈の血流動態解析を可能にした多時相tagging型RFパルスを開発して評価を行う手法を提案して臨床疾患評価を実施している。本手法は、MRIに対して特別なハードウェアの改良を必要とせずRFパルス・傾斜磁場を時系列に制御するパルスシーケンスソフトウェアのみを変更することで使用できるなど大変有用性に優れている。

第6章では、本論文により得られた成果をまとめるとともに、MRI用RFパルス関数の設計とMRIでの心臓心室動態評価を適用する上での技術課題と展望について述べている。

山口弘次郎氏の博士論文で論じられている上記研究に関連した成果は著名な学術雑誌論文5編(全て審査有)に公表されており、それらの学術的価値から博士論文として十分な内容と判断される。よって、本審査委員会は、本論文が博士(工学)の学位として適格であると認める。