

氏 名	すが 菅 幹 生
学位(専攻分野)	博 士 (人間・環境学)
学 位 記 番 号	論 人 博 第 13 号
学位授与の日付	平 成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	磁気共鳴画像装置による変動周期の短い対象の計測に関する研究 —心拍動による画像歪みの評価と高速撮影法の開発ならびに強制振動を利用 した弾性率の計測法—
論文調査委員	(主 査) 教 授 江島義道 教 授 前川 覚 教 授 大東祥孝 教 授 森谷敏夫 教 授 英保 茂(情報学研究科) 教 授 松田哲也(情報学研究科) 教 授 宇山親雄 (広島国際大学)

論 文 内 容 の 要 旨

人間と環境の関わり方を見出すためには、その主体となる生体を理解することが極めて重要である。本学位申請論文は、生体の生理情報を計測・認知するための新しい方法を開発・評価したものである。具体的には、近年普及の著しい磁気共鳴画像装置(MRI)を利用し、変動周期の短い対象の計測法に関する3つの課題を検討した。

本論文は6章より構成されている。まず、第1章では、先行研究との関わりにおいて本研究の意義を提示した。一般に、MRIは対象が静止していることを前提としているため、移動・変形する対象の正確な測定は困難である。この困難を克服するには、MR画像からの実形状の推定法、ノイズの軽減法及び高速撮影法の開発が必要である。本研究は、このような要請に応えようとするものである。

第2章では、撮影断面や2次元位置情報を付加するための方法といったMRIの計測原理を述べて、MR画像が、変動する撮影対象に対してどのような「歪み」、「ぼけ」及び「ノイズ」を生じるかを具体的に示し、対象の形状を正確に推定するための克服すべき課題を明らかにした。また、以下の章において、動きによる再構成像の誤差を解析する際に必要となる撮影中に移動や変形をする対象に対するMR信号の理論式を導出している。

第3章では、短い周期で変動する臓器の代表である心臓を対象として、高速スピンワープ法(1枚あたり約0.3秒で撮影する高速スピン法)によって得られるMR画像の誤差の特徴とその程度を左心室壁計算機モデルと第2章で導出した理論計算式を用いて定量的に評価した。まず、MR信号の理論式に基づいて、計算機で高速スピンワープ法によるMR画像(以下、理論計算MR画像)を生成するプログラムを作成した。そして、実際にMRI装置で撮影した実験MR画像と理論計算MR画像を比較することで、理論計算MR画像生成プログラムの精度が高いことを示した。次に、拍動する左心室壁計算機モデルと理論計算MR画像を比較することで、高速スピンワープ法による心臓の左心室内径の描出精度や、その拍動による再構成像の歪み誤差を定量的に評価した。その結果、再構成した心臓MR画像と撮影期間中期でのモデルの形状がよく一致することを示した。また、臨床上特に重要な拡張末期と収縮末期に相当する再構成像の内径と、左心室壁計算機モデルの内径との差が10%以内に収まることを定量的に示し、心臓撮影における高速スピンワープ法の有効性を明らかにした。そして、健康者ボランティアを対象とした心臓撮影実験によって、キーホール法を用いた心臓映画MR撮影法の臨床的実用可能性を明らかにした。

第4章では、心筋に関する疾患を診断する上で重要な単一心拍内での心拍動動態を心臓映画MR画像によって観察するために、キーホール法(原データの一部だけを更新することで撮影時間を短くする手法)と高速スピンワープ法を組み合わせた新たな撮影法を提案し、その最適撮影条件を求めた。また、撮影時に壁運動のある左心室短軸とMR再構成像の座標軸(周波数エンコーディング)の方向を一致させることで、単一心拍内に約10枚の断層撮影を完了することができることを明らかにした。さらに、左心室壁の拡張ないし収縮期間中の急速な動きなど、左心室壁の瞬時的な動きが観察できることを

明らかにした。そして、健常者ボランティアを対象とした心臓撮影実験によって、キーホール法を用いた心臓映画 MR 撮影法の臨床的実用可能性を明らかにした。

第5章では、外部加振装置を用いて撮影対象内部に発生させた短い周期変動を積極的に利用する生体内軟組織の弾性率分布を計測するための方法とそのデータ解析手法を提案した。磁気共鳴弾性画像法（MRE: MR Elastography）は組織内部を伝搬する弾性波を画像化する撮影法である。MRE 画像中の弾性波の波長は一般に10画素から数10画素と長くなることが多く、また、反射の影響を避けるため局所波長の測定に利用可能な関心領域の大きさが1波長以下になることが多いので、既存の計測手法によっては正確に局所波長を測定することができない。そこで、MRE 画像から弾性率の局所分布を得るために、初期位相の異なる複数の MRE 画像を用いた局所波長計測手法を提案した。提案手法と従来法を、実際の MRE データに即した測定条件下における空間周波数特性やノイズ特性に対して比較した結果、提案手法は空間分解能がより高く、ノイズに対してより頑強であった。また、MRI 装置ガントリ内で使用可能な加振装置と MRE 撮影パルスシーケンスを作成し、これにより得られた MRE 画像に対して提案手法を実現するシステムを作成した。本システムは、硬さの異なる複数の試料の弾性率の計測に有効であり、生体組織の弾性率の計測に応用できるものである。

以上をふまえて、最後の第6章では、本論文の要約として、本研究の結果が MR 生体計測の適用範囲を広げるとともに、信頼性の評価や定量性の向上に寄与するものであると述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、磁気共鳴画像装置（MRI）を利用して、従来困難とされていた変動周期の短い対象の計測法を開発・評価したもので、生体の生理情報計測法の進歩に貢献するものである。

申請者は、変形・運動する物体を測定対象として、MR 信号の理論式に基づく MR 画像（理論計算 MR 画像）と実際の MR 画像を用いた実験によって、動的物体の正確な特徴量（形状や波長）を計測する方法を探究し、精度の高い方法を見出している。

本研究の大きな成果は3点である。

まず、静止物体を前提とした MRI を、動的物体の測定に応用するときの問題点を分析し、その問題を克服するため、移動や変形をする対象に対する MR 信号の理論式を導出している。そして、MR 信号の理論式に基づく MR 画像（以下、理論計算 MR 画像）を生成するプログラムを作成し、左心室壁計算機モデルに適用している。そして、左心室壁計算機モデルと理論計算 MR 画像を比較することで、左心室内径の変化はモデルの変化とよく一致し、収縮末期と心拡張末期を含んだ大部分の心時相において誤差は10%以内に収まることを定量的に明らかにした。MR 画像上の誤差の程度は、医師が診断をする上で重要な情報であるにも関わらず、従来定性的な評価にとどまっていた。この研究成果は、この分野の権威ある学術雑誌に発表しており、心臓撮影に高速スピนวープ法（1枚あたり約0.3秒で撮影する高速スピン法）を用いることによって臨床上十分に有用な画像が得られることを定量的に裏付けた点で高く評価できるものである。

つぎに、心筋に関する疾患を診断する上で重要な単一心拍内での拍動の様子を心臓映画 MR 画像によって観察するために、キーホール法（原データの一部だけを更新することで撮影時間を短くする手法）と高速スピนวープ法を組み合わせた新たな撮影法を提案し、その最適撮影条件を求めている。単一心拍内での拍動の動態の測定には、従来は、心拍動の周期性を利用した心電図同期法が用いられていたが、撮影時間が長く、不整脈がある場合にはこの方法の適用はできなかった。撮影時に壁運動のある左心室短軸と MR 再構成像の座標軸（周波数エンコーディング）の方向を一致させるという申請者が提案する方法を用いれば、単一心拍内で心臓映画 MR 画像の撮影を完了でき、また、左心室壁の瞬時的な動きが観察できる。申請者の提案した方法は、撮影時間を短縮することで患者への負担を軽減するとともに、撮影可能な患者の範囲を広げることができる点で優れており、高く評価できる。また、この研究成果はすでに権威ある国際誌に掲載されている。

さらに、外部加振装置を用いて撮影対象内部に発生させた短い周期変動を積極的に利用して、生体内軟組織の弾性率分布を計測するための方法とそのデータ解析手法を提案している。磁気共鳴弾性画像法（MRE: MRElastography）は組織内部を伝搬する弾性波を画像化する撮影法である。従来の計測法では、計測対象が1波長以下の大きさである場合には、正確に局所波長を測定することができない。申請者は、初期位相の異なる複数の MRE 画像を用いる新たな局所波長計測手法を提

案し、MRE 画像から弾性率の局所分布を得ることに成功している。申請者の提案している方法は、実際の MRE データに即した測定条件下で、空間分解能と耐ノイズ性で従来の方法に優っている。また、硬さの異なる複数の試料の弾性率計測に有効であり、生体組織の弾性率の計測に広く応用できるので、臨床応用上も高く評価できる。なお、この研究成果は権威ある国際誌に掲載予定である。

申請者の研究は、MR 生体計測の適用範囲を広げ、信頼性の評価や定量性の向上に寄与するものである。提案された高速撮影法や局所波長計測手法は従来十分な時間・空間分解能で計測することができなかった対象を計測可能にしたという観点で高く評価でき、この分野の研究に大きく貢献するものである。また、環境の認知機構を総合的に考察するという人間・環境学専攻、環境情報認知論講座の目的に添ったものである。

よって本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年2月3日、論文内容とそれに関連した事項について試問をおこなった結果、合格と認めた。