

氏 名	おい だ たけ のり 笈 田 武 範
学位(専攻分野)	博 士 (情 報 学)
学 位 記 番 号	情 博 第 230 号
学位授与の日付	平 成 18 年 9 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	情 報 学 研 究 科 シ ス テ ム 科 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Magnetic Resonance Elastography を用いた生体組織の弾性計測に関する研究
論文調査委員	(主 査) 教 授 松 田 哲 也 教 授 熊 本 博 光 教 授 小 林 哲 生

論 文 内 容 の 要 旨

医療分野において、組織の硬さは触診により診断や疾患の進行状況の把握に用いられてきた重要な情報の一つである。定量的かつ非侵襲的に組織の硬さを計測する一手法として、磁気共鳴画像法（MRI）を用いた Magnetic Resonance Elastography（MRE）法が提案されている。MRE 法では、計測対象に与えた振動が計測対象内を伝播する様子を画像化し、取得した MRE 画像から波長および減衰率を導出して粘弾性定数を計算するという手順で計測を行う。

本論文は、この MRE 法による粘弾性計測の精度向上および計測領域の拡大を目的として、新しい加振装置と波長・減衰率導出法を提案・実装し、また、撮影法の比較を行い、それらの有効性を検証したものであり、全体で6章からなっている。

第1章は、本論文の序論であり、医療分野における粘弾性計測の意義と MRE 撮影法および波長・減衰率導出法の現状を概説し、その問題点について説明している。

第2章では、粘弾性波と粘弾性定数との関係を述べ、本論文が対象としている MRE法による粘弾性波の画像化の原理を説明している。

第3章では、計測対象の広い範囲において高精度な粘弾性計測を実現することを目的に、従来のプローブ型加振装置に比べ計測対象との接触面積を拡大したベッド型加振装置を提案し、ファントム実験および in-vivo における人体組織の計測を通じて計測対象内の広い範囲にわたり粘弾性計測が実現されることを確認している。

第4章では、MRE 画像から高精度・高空間分解能で波長・減衰率を導出する手法に関する検討を行っている。MRE 法ではノイズの影響を低減するため、位相の異なる複数の MRE 画像を用いて波長・減衰率を導出する方法が検討されているが、これまでに報告されている波長・減衰率導出法には、微分演算を含むためノイズに敏感であるという問題や、導出に使用できる多重位相画像数の最大値が制限されるという問題があった。本章では、これらの問題を解決するため、多重位相 MRE 画像から抽出した時空間データに対して関数あてはめを行うことにより波長・減衰率を導出する弾性波あてはめ法を提案している。シミュレーション実験およびファントム実験により、提案手法では従来の導出法と同程度以上の精度で剛性を計測可能であり、また関数あてはめに使用するデータ量を増大させることにより計測精度の向上が可能であることを示している。しかしながら、粘性率に関しては計測精度が不十分であり、今後改善が必要であることを示している。

第5章では、MRE 法の計測精度を向上するため様々な撮影法の比較・検討を行っている。第4章で提案した弾性波あてはめ法も含め、既存の波長・減衰率導出法では反射や屈折の影響を考慮しておらず、反射波を含む MRE 画像に適用すると大きな誤差を生ずる。従って一般には、計測対象を伝播する粘弾性波が反射や屈折を生じる時刻よりも前に撮影時刻を設定するが、このような撮影法では振動が定常状態に至る前の過渡状態を撮影している可能性があり、高精度な波長・減衰率導出が困難となる。本章では、一般に用いられる撮影方法が過渡状態を撮影していることを実験的に示し、さらに振動の定常状態を撮影する手法を提案して、波長・減衰率導出精度の向上に有効であることを確認している。また、定常状態の振動の撮影では解析の妨げとなりうる反射波の影響を軽減するため、反射波成分を抑制するフィルタの一つである spatio-temp-

oral directional filter に窓関数を併せて適用する手法を提案し、シリコンゲルファントムを用いた実験によりその有効性を示している。

第6章は結論であり、本論文で得られた知見を述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、医療分野において古くから触診により診断に用いられてきた組織の硬さの情報を定量的かつ非侵襲的に計測する方法として近年注目されている磁気共鳴画像法（MRI）による Magnetic Resonance Elastography（MRE）法を対象に、その粘弾性計測の精度向上および計測領域の拡大を目的として、新しい加振装置と波長・減衰率導出法を提案・実装し、また、撮影法の比較を行い、それらの有効性を検証したものであり、得られた成果は以下のようにまとめられる。

- (1) MRE 法では、外部から与えた振動が計測対象内を伝播する様子を画像化し、取得した MRE 画像から波長および減衰率を導出して、粘弾性定数を計算するという手順で計測を行う。一般に外部からの加振には接触面積の小さなプローブが用いられているが、MRE 法では平面波を仮定して粘弾性波の運動方程式を解くことにより粘弾性を計測するため、波が半球面状に伝播するプローブ型加振装置では、高精度に粘弾性計測を行える範囲が制限されるという問題がある。本論文では、計測対象との接触面積を拡大したベッド型加振装置を提案し、ファントム実験および in-vivo における人体組織の計測を通じて、計測対象内において横波のみの平面波が伝播し、広い範囲にわたって粘弾性計測が実現されることを確認している。
- (2) MRE 法では MRE 画像から波長・減衰率を導出して粘弾性定数を計測する。MRE 画像におけるノイズの影響を低減するために、位相の異なる複数の MRE 画像を用いて波長・減衰率を導出する方法が報告されているが、これらの導出法では微分演算を含むためノイズに敏感であるという問題や、導出に使用できる多重位相画像数の最大値が制限されるという問題があった。本論文では、これらの問題を解決するため、多重位相 MRE 画像から抽出した時空間データに対し関数あてはめを行うことにより高精度・高空間分解能で波長・減衰率を導出する弾性波あてはめ法を提案している。シミュレーションおよびファントム実験により、提案手法では従来の導出法と同等以上の精度で剛性率を計測可能であり、また関数あてはめに使用するデータ量を増大させることができ、計測精度の向上つなげることを示した。
- (3) 従来の MRE 法では反射や屈折の影響を回避するため、計測対象を伝播する粘弾性波が反射や屈折を生じる時刻よりも前に撮影時刻を設定する。しかし、このような撮影法では振動が定常状態に至る前の過渡状態の撮影となるため、高精度な波長・減衰率導出が困難となる可能性がある。本論文では、このような従来法は過渡状態を撮影していることを実験的に示し、さらに振動の定常状態を撮影する手法を提案して、波長・減衰率導出精度の向上に有効であることを確認している。また、定常状態の振動の撮影では解析の妨げとなりうる反射波の影響を軽減するため、反射波成分を抑制するフィルタの一つである spatio-temporal directional filter に窓関数を併せて適用する手法を提案し、シリコンゲルファントムを用いた実験によりその有効性を示している。

以上のように、本論文は、生体組織の硬さを定量的かつ非侵襲的に計測する方法である MRE 法において、従来法の課題とされてきた計測精度と計測効率の向上を実現する方法を提案・実装し、実験的に評価することによって、実用に供する技術としたものであり、学術的にも実用性の上でも極めて有意義であると言える。

よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成18年8月2日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。