

審査の結果の要旨

氏名 松井和洋

本論文は高強度集束超音波治療の有効性・正確性・安全性の向上を目指した超音波撮像を用いた高強度集束超音波治療の焦点定位および強度推定を取り扱っている。高強度集束超音波治療は切開を必要とせず腫瘍の焼灼治療を行うことの可能な次世代の低侵襲治療技術として研究開発が行われ、一部臨床治療技術として実用化されている。超音波は組織の音速・減衰特性等の不均一性により、集束超音波発生装置の幾何学的焦点とは異なる部位にエネルギーが集束する可能性や集束部位における超音波強度の制御性が大幅な低下するといった課題がある。このため集束部位のモニタリング技術が重要であり、現状ではその治療モニタリングとしては主として組織の温度モニタリングが可能な核磁気共鳴画像 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) による手法が使われている。しかし焼灼結果としての温度上昇を計測していること、非磁性体の集束超音波機器・モニタリング機器を必要とすること、高価であることなどから、より簡便でリアルタイム性の高い超音波画像計測の応用研究が進められている。本論文は超音波撮像を用いた高強度集束超音波治療の焦点定位および強度推定手法の提案を行っている。

第1章では高強度集束超音波治療技術における組織に対する熱的治療効果を示す指標であるサーマルドーズ量推定において重要となる音場・強度推定技術の現状と課題を述べ、本研究の目的を述べている。

第2章では透過系計測システムにおいて、集束超音波が形成する音場の推定問題に対して、時間反転法を拡張し、超音波画像再構成手法であるビームフォーミングを活用することで高速かつ簡便に同定する手法を提案している。実験により音場歪みの存在下においても、推定誤差が18%程度に抑えられたことから、その妥当性を検証するとともに、再構成を可能とする条件や、装置に求められ性能について理論・数値計算に基づいて考察している。

第3章では散乱系計測システムにおいて、集束超音波が形成する音場の推定問題に対して、高強度集束超音波装置からの治療時と同程度の振幅強度を有する短パルス波を媒質に照射した際に反射・散乱され戻ってくる超音波信号を通

常の超音波医用画像装置で受信することで、組織内での高強度集束超音波の集束状況を、熱的障害を抑制しつつ計測する High Intensity Focused Ultrasound Beam Imaging 法の改良を試みている。本手法の意義が、撮像用開口面積に対して治療用開口面積が 10~30 倍程度大きいことに起因する、治療用音場と撮像用音場の差分検出である点を、数値計算を交えて論じた後、本手法の根本的課題である組織の散乱不均一性の影響を補正して集束状況を正確に推定するために、電子制御で収束点を移動させつつ超音波信号を受信し、散乱特性が一定という仮定の下に問題の悪条件を低減し推定する手法を提案している。生体組織を使用した実験により、焦点位置推定誤差 1 mm 以内およびビーム形状が正確に推定されていることを実証し、その有効性を確認した。

第 5 章では、高強度超音波集束部位での音響強度の推定問題に対して、音響放射圧で組織が変位する現象を利用し、その変位計測および組織力学特性を仮定した組織変位特性の Green 関数を用いた理論計算から強度推定する手法を提案している。特に理論計算の上で同定が難しい粘り粘性特性の影響を除くために、一定時間超音波を照射した結果として、粘り粘性項が無視できる時間帯での計測を行うことを試み、生体模擬材料を用いた検証実験の結果、推定誤差が 6%程度に抑えられたことから、その妥当性を実証している。またこの手法の誤差要因として高強度超音波の非線形伝搬特性等の効果を論じている。

以上の研究成果は、高強度集束超音波治療の有効性・正確性・安全性を向上させるうえで重要となるサーマルドーズ量推定のための基盤要素技術を与えるものである。特に、通常使用される医用超音波画像計測装置を活用して行うことが可能な技術を提案しており、臨床応用への有用性が高い研究である。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。