

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350569

研究課題名(和文) 医用超音波画像の高画質化・高機能化に関する研究

研究課題名(英文) A Study for High-Quality and High-Functional Medical Ultrasound Images

研究代表者

田川 憲男 (TAGAWA, NORIO)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：00244418

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、医用超音波画像の高精細化、高機能化、及び高解像度化を目指した。まず高精細化に関しては、スペックル抑圧手法、高調波イメージングのためのFDA補償手法、高機能化としては、生体安全性に配慮した腫瘍部分の硬さ計測手法、高解像度化としては、合成開口イメージングとしての搬送波位相情報を利用した超解像手法を提案した。それらの有効性を、有限要素法によるシミュレーションならびに実験を通して確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aim to perform high-definition imaging, high-functional imaging and high-resolution imaging. We proposed some new methods for speckle suppression and FDA compensation of harmonic imaging as high-definition imaging, elastography specially used for tumor in consideration of living body safety as high-functional imaging and super resolution synthetic aperture method based on the phase information of carrier waves. The effectiveness of these methods was confirmed through FEM simulations and experiments.

研究分野：医用超音波工学

キーワード：医用超音波画像 スペックル抑圧 FDA補償 硬さ計測 超解像 MUSICアルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

医用超音波診断は被曝の問題がなく、実時間画像化が可能であり、超音波の反射強度だけでなく、その伝搬速度や減衰率、ドップラ周波数等の計測により、診断に有用な様々な情報を獲得可能である。この特徴を更に強調するためには、画像の高精細化・高解像度化が重要となる。

当該研究者は2009年から2012年にかけて、科学研究費補助金・基盤研究(B)の交付を受けて、IVUS(血管内超音波法)の高性能化に関する研究を行ってきた。その過程において、IVUSに制限されないいくつかの画像化技術の開発を進めてきた。そこで得られた画像の高精細化ならびに組織の硬さ計測に関する技術は、更なる拡張が期待できる。

一方、血管壁や乳腺等、対象の高精度な位置検出が、診断のために重要となることが多い。そのためには、通常のBモード画像に加えて、反射率分布を直接、エコーから復元する画像化法が有効と考えられる。当該研究者は以前、アレイアンテナによる電波到来方向の決定を目的に開発された MUSIC (Multiple Signal Classification) 法で用いられるアルゴリズムを応用し、距離方向の散乱体位置の超解像検出を可能とする SCM (Super-resolution FM-Chirp correlation Method) を提案した。本手法はBモード画像に比較して十分な超解像特性を有するものの、複数回のパルス送受信が必要であるため、実時間画像化に難がある。

以上の背景のもと、本研究では医用超音波画像全般に適用可能な高精細技術、超解像技術の開発を目指す。

2. 研究の目的

(1) 超音波画像の他の医療画像に対する一番の特徴は、スペckルパターンである。これは、隣接する複数の微小散乱体からの反射波が干渉して生じるものであり、生体組織の性状情報を含む一方で、臓器境界や血管壁等の構造的な情報の検出を阻害することがある。今回は、以前より開発してきたスペckル抑圧法の改良と評価を行う。

(2) 組織の硬さを画像化する Elastography は、研究初期の静的な歪み計測に基づく定性的な手法から、生体内に発生させた横波の音速計測に基づく動的な手法へと研究の方向性が変わってきている。後者の代表は ARFI (音響放射圧) イメージングであるが、強い圧力を超音波によって生体内に与えることから安全面の懸念がある。そこで当該研究者は、軟部組織内に存在する腫瘍の硬さ計測に限定して、Bモード画像化と同程度の強度の超音波を利用する手法を検討している。本研究では、この方針での具体的な画像化手法を開発する。

(3) FDA (周波数依存減衰) は、超音波の

周波数が高くなるにつれて減衰が指数関数的に増える現象であり、高周波画像化の際にS/Nの低下を引き起こす。当該研究者は、送信パルスの周波数帯(基本波帯)に対して、FDAを補償する画像化手法を提案している。一方で、生体内を超音波が伝搬する過程で非線形性によって生じる高調波を利用する画像化が注目されている。高調波イメージングでは基本波に比べて広い周波数帯域を利用できることから、高精細な画像化に適するものの、反射波が微弱であり、また周波数が高いため、FDAによる画質劣化が著しい。本研究では、高調波帯におけるFDA補償法を検討する。

(4) 上述の超解像手法が有する欠点を克服し、実時間での画像化の実現を目指す。アレイトランスデューサを想定することで、必要な送受信回数を減らす方針を採用する。これにより、心臓周辺や呼吸による動きの大きい臓器に対する超解像が可能となる。

3. 研究の方法

(1) 既提案手法は、スペckルパターンに強制的に時間的不規則性を付与する抑圧手法として、トランスデューサ位置、あるいは送信ビームの焦点位置を深さ方向に不規則に変動させる方法である。それぞれ、機械振動法、フォーカス振動法と呼ぶ。両手法とも原理的に、信号のボケが生じる可能性があり、さらに前者はエコー積算処理の前に適切な時間シフトを加える必要がある。これらの問題を回避する新たな手法を検討する。

(2) 検討してきた縦波-横波モード変換を利用する組織の硬さ計測では、Bモード画像化用程度の周波数と強度の縦波超音波ビームを腫瘍部分に照射し、軟部組織との間の硬さ境界でモード変換により効率的に生じる横波(shear wave)の音速を計測するものである。この音速計測における困難は、横波の短波長性と小振幅性である。これらを解決する具体的な計測手法を検討する。

(3) 既提案のFDA補償法は、FMチャープ波を用いるパルス圧縮イメージングにおいて、受信エコーの基本波成分がFDAによって減衰を受けた後に所望の波形となるよう、送信波形を適切に決定するものである。この手法を拡張し、高調波がFDA減衰後に所望の波形となる送信波生成を検討する。

(4) 既提案のSCMでは、各画像ラインに対して周波数の異なる複数の送受信を必要とするため、実時間画像化が困難であった。そこで、SCMを拡散波送受信を基本とする合成開口イメージング方式へと拡張することで、実時間性の回復を検討する。

4. 研究成果

(1)本研究では、送信パルスの搬送波周波数を不規則に変化させて複数のエコーを採取し、それらの解析信号としての平均を出力とする周波数変動法を提案した。スペックル抑圧によるS/Nの向上を、シミュレーションにより評価した。既提案の機械振動法、フォーカス振動法がそれぞれ、3.51dB、3.35dBの向上であったのに対し、周波数変動法では5.87dBであった。周波数変動法は、従来の周波数コンパウンド法と類似の手法であるが、周波数コンパウンド法は周波数を比較的大きく変えて得られるBモード画像を平均化するのに対し、周波数変動法は周波数を小刻みに変えて多くのエコーを受信したのち、解析信号としての平均操作による位相の打ち消しを利用している点で異なる。今後、両者の適用性も含めた比較検討が必要である。

(2)検討を進めている硬さ計測法では、細い超音波ビームを腫瘍部分に照射して、その内部にモード変換された横波を発生させる必要があるため、比較的高い周波数の超音波を用いることになる。そこで、周波数の若干異なる2つのビームを照射することでビート波を発生させることとした。しかし、そのビート波の振幅は小さいため、振幅変化を追跡する直接的な音速計測が難しい。そこで、速度計測用の追跡ビームにFMチャープパルスを利用する。チャープ信号はドップラ効果によりエコーが乱れるため、これを利用することで、ビート波の腹と節を認識でき、波動の追跡が可能となる。今回は、この計測方式の実現可能性を、簡単なシミュレーションによって確認した。今後、実システムとしての評価が必要である。

(3)既提案の基本波に対するFDA補償は、参照用送受信を行って、送信パルスとFDAによる減衰後の受信エコーを比較することで補正関数を求め、これを使って望ましい送信波形を決定する。この方法を高調波に拡張するには、基本波エコーと高調波エコーの関係を求めておいて、それを介することで、2次高調波が理想的な波形となるように送信波形を計算可能である。本研究では、基本波と2次高調波の関係を単純に倍周波数とみなしてシミュレーション及び実験を行った。FDA補償による効果は確認できたが、基本波に対する処理と比べてその効果は少なかった。上述の基本波-高調波の写像関係を厳密に定義する等の工夫が今後の課題である。

(4)SCMを合成開口へと拡張したSA-SCM(Synthetic Aperture-Super resolution FM-Chirp correlation Method)を提案した。SA-SCMでは拡散波を画像化対象領域に向けて一斉送信するため、SCMに比べて画像ライン数分の1の送受信回数で1枚の画像が得られ、実時間性が大幅に向上する。シミュレーションならびに実験を通して、SA-SCMの超

解像特性も確認できた。しかし、合成開口処理において、拡散波は通常、理想的な円筒波として扱われるため、実際の歪みを有する伝搬の影響でSCMに対しての劣化がみられた。これを避けるためには、各振動子の受信エコーに対してSCMを施した後、遅延加算によるビーム形成を行う等の工夫が有効と考えられる。また、方位方向の超解像化も今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3件)

T. Hiraoka, N. Tagawa, K. Okubo, I. Akiyama, Compensation Method for Frequency-Dependent Attenuation in Tissue Imaging by Amplitude Modulation for Chirp Transmission, *Acoust. Sci. & Tech.*, 査読有, vol.36, no.3, 2015, pp.201-207

DOI: 10.1250/ast.36.201

T. Wada, Y. Ho, K. Okubo, N. Tagawa, Y. Hirose, High Frame Rate Super Resolution Imaging Based on Ultrasound Synthetic Aperture Scheme, *Physics Procedia*, 査読有, vol.70, 2015, pp.1216-1220

K. Nii, N. Tagawa, K. Okubo, S. Yagi, Finite Element Method Study for Generating Shear Wave by Mode Conversion of Longitudinal Wave at Elasticity Boundary in a Living Body, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, vol.52, no.7, 2013, pp.07HF01-1-8

DOI: 10.7567/JJAP.52.07HF23

DOI: 10.1016/j.phpro.2015.08.262

[学会発表](計 31件)

T. Wada, N. Tagawa, K. Okubo, High Frame Rate Super Resolution Ultrasound Imaging Based on Synthetic Scheme, *T01N Int. Symp. Biomedical Engineering*, 14 Dec. 2015, Yokohama.

T. Wada, Y. Ho, N. Tagawa, K. Okubo, Extension of FM-Chirp Super Resolution Imaging for Ultrasound Synthetic Aperture System, *IEEE Int. Ultrasonics Symp.*, 21-24 Oct. 2015, Taipei, Taiwan. 和田貴之, 大久保寛, 田川憲男, 広瀬意育, FMチャープ超解像イメージングの合成開口方式による効率の実現", 電子情報通信学会 超音波研究会, 2015年2月27日, 横浜.

T. Wada, T. Hiraoka, Y. Hirose, N. Tagawa, K. Okubo, A Study for High-Definition Ultrasound Imaging Based on Synthetic Aperture Scheme, *Symp. on Ultrasonic Electronics*, 3-5

Dec. 2014, Tokyo.

T. Hiraoka, N. Tagawa, K. Okubo, Y. Ho, I. Akiyama, Compensation Method of Frequency Dependent Attenuation for Tissue Harmonic Imaging, 2014 IEEE Int. Ultrasonics Symp., 3-6 Sep. 2014, Chikago, USA.

K. Nii, N. Tagawa, K. Okubo, Y. Ho, S. Yagi, Sound Speed Measurement of Weak and High-Frequency Shear Wave Generated via Mode Conversion of Longitudinal Wave, 36th Annual Int. Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 26-30 August 2014, Chikago, USA.

J. Fujikawa, N. Tagawa, K. Okubo, Y. Ho, Reflectance Distribution Estimation in a Human Body using Ultrasonic Echoes and Statistical Model, Int. Forum on Ultrasound Applications, 26-27 March, 2014, Takao, Taiwan.

平岡拓也, 田川憲男, 大久保寛, 秋山いわき, AM 変調された FM チャープ送信信号による生体高調波画像の FDA 補正, 電子情報通信学会 超音波研究会, 2014 年 2 月 21 日, 東京.

H. Suzuki, N. Tagawa, K. Okubo, Ultrasound Speckle Reduction by Randomly Changing Bandwidth of Transmission, Symp. on Ultrasonic Electronics, 20-22 Nov. 2013, Kyoto.

T. Hiraoka, N. Tagawa, K. Okubo, I. Akiyama, A Method for Reduction of Frequency Dependent Attenuation in Tissue Harmonic Imaging, Symp. on Ultrasonic Electronics, 20-22 Nov. 2013, Kyoto.

H. Hiraoka, N. Tagawa, K. Okubo, I. Akiyama, Recursive Reduction of Frequency Dependent Attenuation for Wide-Band Ultrasound Imaging in a Living Body, IEEE Int. Ultrasonics Symp., 21-25 July 2013, Prague, Czech Republic.

H. Suzuki, N. Tagawa, K. Okubo, A Study on Ultrasound Speckle Reduction Based on Stochastic Fluctuation of Transmitted Ultrasound Beam, IEEE Int. Ultrasonics Symp., 21-25 July 2013, Prague, Czech Republic.

平岡拓也, 田川憲男, 秋山いわき, 大久保寛, 広帯域パルス圧縮画像化における再帰的 FDA 補正の性能評価, 日本超音波医学会 第 86 回学術集会, 2013 年 5 月 24-26 日, 大阪

新居弘平, 田川憲男, 八木晋一, 生体内弾性境界における縦波から横波へのモード変換に関する特性評価, 日本超音波医学会 第 86 回学術集会, 2013 年 5 月 24-26 日, 大阪

H. Suzuki, N. Tagawa, K. Okubo, A Study on Speckle Suppression by Stochastic Vibration of Ultrasound Transducer, Int. Acoustical Imaging Symposium, 29 April-1 May 2013, Singapore.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

<http://www.sd.tmu.ac.jp/t-lab/tagawalab/Welcome.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田川 憲男 (TAGAWA NORIO)
首都大学東京・システムデザイン研究科・教授
研究者番号: 0 0 2 4 4 4 1 8

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

八木 晋一 (YAGI SHIN-ICHI)
明星大学・情報学研究科・教授
研究者番号: 6 0 0 5 3 7 0 8

秋山 いわき (AKIYAMA IWAKI)
同志社大学・生命医科学部・教授
研究者番号: 8 0 1 9 2 9 1 2