

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630165

研究課題名(和文) 球面拡散ビームによる革新的超音波イメージング

研究課題名(英文) Innovative ultrasound imaging with spherically diverging beam

研究代表者

長谷川 英之 (HASEGAWA, Hideyuki)

東北大学・医工学研究科・准教授

研究者番号：00344698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：従来、超音波断層像の構築においては、送信・受信ともに集束ビームを形成し、方位分解能を向上させている。しかし、送信・受信ともに集束させる場合、一般的に1回の送信につき1方向しかビームを形成しないため、断層像内各点のデータは1方向のビームから得ている。超音波反射は角度依存性が大きいため、曲率を有する対象物、例えば血管の輪切り断面などは円周方向に一律な画像を得ることは困難である。本研究では、球面状に拡散する送信ビームを用い、1回の送信ごとに角度の異なる多数の受信集束ビームを形成して重ね合わせることで、超音波断層像の角度依存性を低減できる画期的な手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Spatial resolution in diagnostic ultrasound imaging is a very important factor determining the accuracy of medical diagnosis. In conventional ultrasound imaging, spatial resolution is improved by using focused beams both in transmit and receive. However, in such a conventional method, an ultrasound beam is created only in one direction in general. Due to the strong angular dependence of ultrasonic reflection, it is difficult to image an object with a curved surface, such as an arterial wall, because the ultrasound beam is perpendicular to the surface of the object in a very limited region. In the present study, a very effective method was developed to reduce the angular dependence of ultrasonic imaging by creating multiple focused receiving beams in different directions using spherically diverging transmit beams produced by transmitting apertures with multiple transducer elements. Multiple transducer elements realize sufficient sound pressure even in the use of a diverging beam.

研究分野：工学

キーワード：超音波 角度依存性 ビーム形成 拡散ビーム 変位ベクトル

1. 研究開始当初の背景

体内からの反射超音波を用いて体内の断層像を得る超音波診断装置は、今や医療診断に欠くことのできないものとなっている。断層像構築においては空間分解能が重要なファクタであることから、送信・受信ともに集束ビームを形成し(図 1(a)), 方位分解能を向上させている。また、送信・受信ともに集束ビームを形成することでサイドローブを低減することができる。しかし、送信・受信ともに集束させる場合、1 回の送信につき 1 方向しかビームを形成することができないため、断層像内各点のデータは 1 方向のビームから得ている。超音波反射は角度依存性が大きい(反射面に垂直に入射した場合が一番反射波強度が大きい)、曲率を有する対象物、例えば血管の輪切り断面(図 2)などは円周方向に一樣な画像を得ることは困難である。送信・受信とも集束するビームを偏向させ、複数の方向のビームを重ね合わせて角度依存性を低減する手法も開発されているが、その場合、断層像内各点のデータを得るために必要な送信回数が増加するため、時間分解能が著しく劣化するという問題がある。

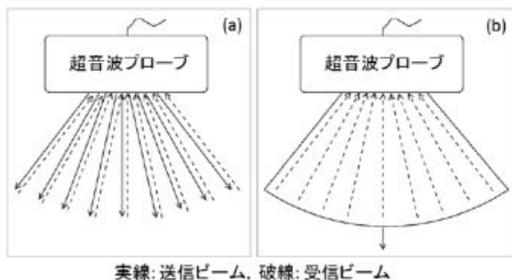


図 1: (a) 従来法(送信・受信ともに集束ビーム)と(b) 本研究で研究開発を行った方法(送信: 球面拡散ビーム, 受信: 集束ビーム)の模式図。

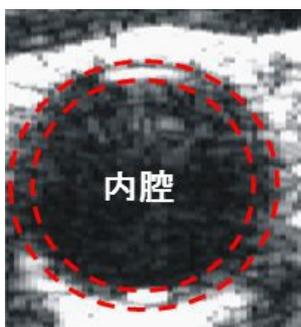


図 2: 健常者の頸動脈の輪切り(短軸)断層像。健常者であるため動脈壁は比較的均一であると考えられるが、超音波像は均一にならない(破線の間が動脈壁)。

2. 研究の目的

本研究では、球面状に拡散する送信ビームを用いることにより、1 回の送信ごとに角度の異なる多数の受信集束ビームを形成する。従来のイメージング方法では、1 方向のみに形成した超音波ビームを用いて断層像を構

築していたため角度依存性が大きかったが、角度の異なるビームを用いることで角度依存性の低減が期待できる(図 1(b))。しかし、送信ビームを集束させないことで方位分解能の劣化が想定されるため、受信超音波信号の位相を用いて方位分解能を向上させ、従来の診断装置と同等以上の方位分解能を維持しつつ角度依存性を低減させることを試みた。また、本手法を生体組織の移動変位ベクトル計測にも適用し、断層画像だけでなく生体組織の機能計測における角度依存性の低減も試みた。

3. 研究の方法

(1) 球面拡散送信ビームに関する検討

非集束ビームとして、平面波を用いた場合、その伝搬方向は 1 方向であるため、方向の異なる多数の受信集束ビームを形成することができない。本研究では、多数の素子を用いて、超音波プローブ内に仮想した点音源から球面状に拡散する送信ビームを用いる(図 3)。そのような送信ビームを実現するために、各素子を駆動する信号の遅延時間を制御する。具体的には、開口中心の素子を最も早く、開口端の素子を最も遅く駆動する。各素子に与える遅延時間は、仮想点音源から各素子までの距離に依存する。仮想点音源と開口面との距離が小さい方が送信波の幅が大きくなり、より多数の角度の受信集束ビームを形成することができる。1 素子またはごく少数の素子のみ駆動することによっても球面拡散波は送信可能であるが、その場合は送信音圧が大きく減少することになる。多数の素子を用いて球面拡散ビームを実現することにより、送信音圧の低下を防ぐことができる。本研究では、送信波面が仮想点音源を中心とした円に対応していると想定して受信ビームフォーミングを行う。

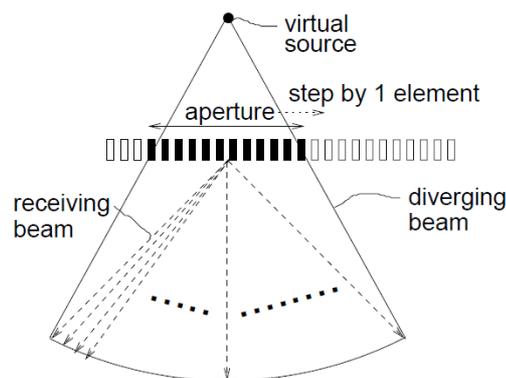


図 3: 多数素子を用いた球面拡散送信ビームの模式図。

(2) 受信ビームフォーミング・断層像構築に関する検討

水中に設置した点散乱体(細径ワイヤの輪切り断面を点散乱体として利用)に対し最適化した球面拡散ビームを照射し、開口の各素子で受信された信号を用いて受信ビームフ

フォーミングを行う。この際、球面拡散送信ビームが散乱体に到達するまでの時間と散乱体からの散乱波が各素子まで戻ってくる時間の情報が必要となるため、仮想点音源を中心とする円を参照に到達時間を計算する。受信ビームフォーミングにより、送信ごとに多数の異なる角度の集束ビームが形成されるため、空間内の各点を異なる角度の複数のビームが通過する。これら複数の集束ビームを重ね合わせることで対称点を画像化できることを確認する。角度の異なる複数の受信集束ビームを重ね合わせることで、角度依存性を低減した超音波像を得ることができる。

(3) 空間分解能の向上・サイドロープの低減に関する検討

本研究では送信波を集束させないため、空間分解能の劣化・サイドロープレベルの上昇が予想される。したがって、これらを改善する手法を開発する。図4に模式的に示すように、受信ビームフォーミングにおいて、想定した散乱点までの往復伝播時間を相殺すると、想定した散乱点と実際の散乱点が一致している場合は各素子で受信した信号の位相が揃っていると考えられる。一方、一致していない場合は位相が揃っていないと考えられる。このような受信信号の特性を利用することで、実際の散乱体以外からの信号を抑圧するとともに(空間分解能の向上)、サイドロープにより想定外の散乱体から発生した散乱波を抑制(サイドロープレベルの低減)する。

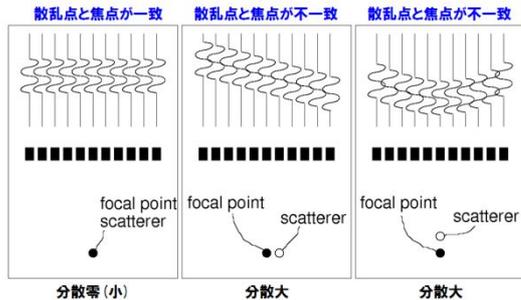


図4: 受信焦点と散乱点の位置関係による受信信号の違い。

(4) 対象物の変位・速度ベクトル計測法の開発

開発した超音波断層像構築手法により得られる超音波 RF 信号をもとに対象物の変位ベクトルを推定する手法を開発する。多次元変位・速度ベクトルの推定法として汎用性の高いスペクルトラッキング法について検討を行った。通常スペクルトラッキング法は、超音波周波数を除去した包絡線信号に適用されるが、超音波周波数で振動する RF 信号を用いることにより変位推定における分解能を向上させることができる。

4. 研究成果

(1) 球面拡散送信ビームを用いた超音波断層像構築

球面拡散送信ビームと、異なる角度で形成した多数の受信集束ビームを用いて超音波断層像を構築することにより、超音波断層像の角度依存性を低減できることを、模擬血管(ウレタンゴム製、内径 8 mm、壁厚 2 mm)を用いた水槽基礎実験により検討を行った。模擬血管には、超音波散乱源となるグラファイト粉末を混入してある。図5は、偏向角度 -20° で形成した受信集束ビームのみを用いて構築した模擬血管の超音波断層像である。

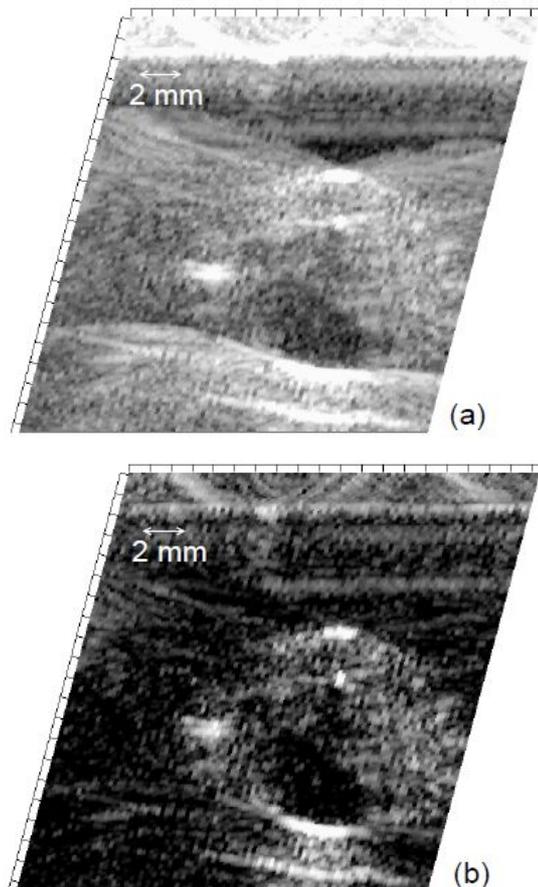


図5: 偏向角度 -20° の受信集束ビームのみで構築した模擬血管の超音波断層像。(a) 通常の遅延和法によるビームフォーミングにより得られた断層像(ダイナミックレンジ: 60 dB)。(b) 通常の遅延和法によるビームフォーミングにより得られたデータに、受信信号の位相の分散を用いた重み付けを行った断層像。

使用した超音波プローブの素子間隔は 0.2 mm であり、使用した超音波の波長(0.15 mm @ 10 MHz)の半分よりも大きい。このような条件下で超音波ビームを偏向した場合、グレーティングロープが描画範囲内に発生する。それにより図5(a)のように不要なエコーが非常に多い断層像となる。超音波プローブの素子ごとに受信された信号の位相の分散を用いて重み付けを行うことにより、図5(b)のように不要エコーを大幅に低減することができる。それにより超音波断層像のコントラストと空間分解能が向上する。

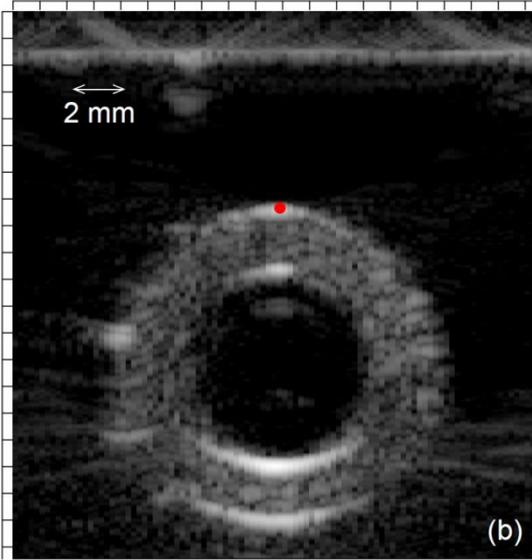
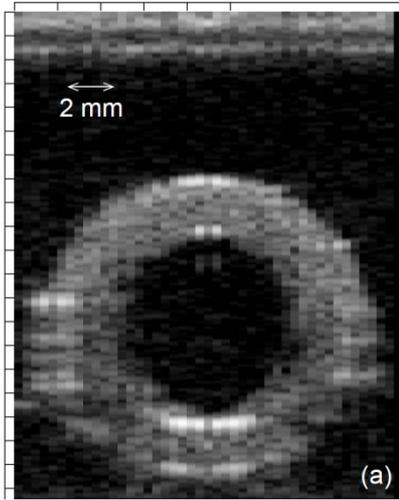


図 6: 模擬血管の超音波断層像。(a) 送信に集束超音波ビームを用いた従来のビームフォーミング法により得られた模擬血管のBモード断層像。(b) 球面拡散送信ビームと $\pm 25^\circ$ の範囲で 5° 間隔で形成した受信集束ビームを重ね合わせるにより得られたBモード断層像。

図 6(a)は、送信に集束超音波ビームを用いた従来のビームフォーミング法により得られた模擬血管のBモード断層像である。それに対し、図 6(b)は送信に球面拡散ビームを用い、受信の際に $\pm 25^\circ$ の範囲で 5° 間隔で形成した受信集束ビームを全て重ね合わせる(RF信号を加算平均)ことにより得られた同じ模擬血管のBモード断層像である。従来のビームフォーミング法(図 6(a))では、送信・受信ともに1方向にしかビームを形成しないため、ビームと模擬血管壁のなす角が垂直に近い狭い領域でしか模擬血管壁境界が描出されていない。それに対し、多数の方向に超音波ビームを形成し、それらを重ね合わせたBモード断層像(図 6(b))では、ビームと模擬血管壁が垂直となる範囲が広がるため、模擬血管壁境界が描出される領域が広くなっ

ていることが分かる。このように、球面拡散送信超音波ビームと、異なる角度で形成した多数の受信集束ビームを用いることにより、超音波断層像の角度依存性を低減できることを示すことができた。動脈硬化のスクリーニングには、頸動脈壁の境界を描出し、壁の厚みを測定することが重要であるため、本手法により血管壁の境界をより広い範囲で明瞭に描出できることは大変有用である。

(2) 対象物の変位・速度ベクトル推定

本研究では、球面拡散送信超音波ビームと、角度の異なる多数の受信集束ビームを用いて、心臓の計測も可能とした。

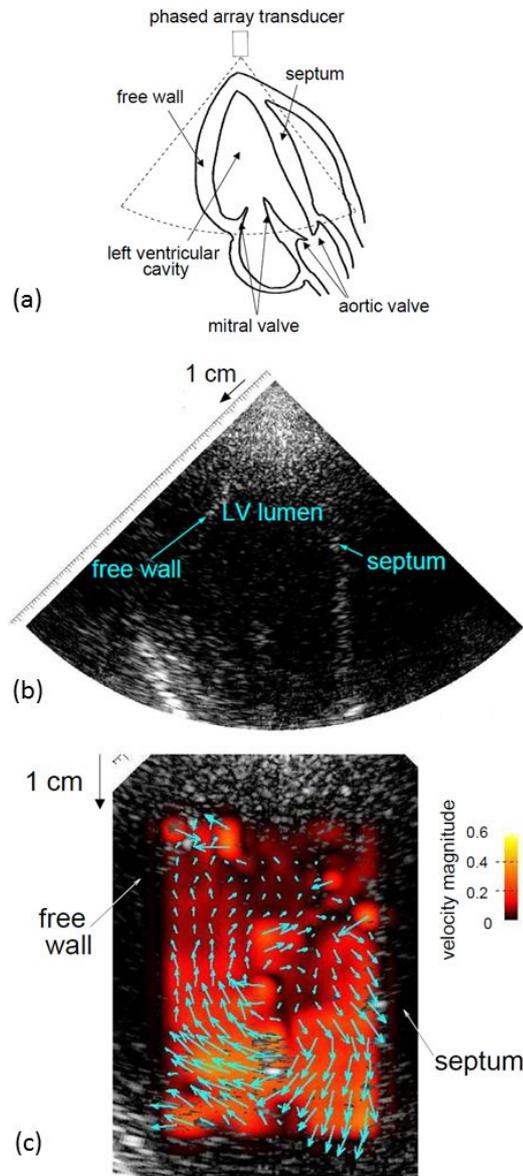


図 7: ヒト心臓の計測結果。(a) 計測断面の模式図。(b) 計測した左心室のBモード断層像。(c) 左心室内血流速度の絶対値をホットスケールおよび矢印の長さで、血流の方向を矢印の方向により示した図。

図 7(a)は、測定した左心室断面の位置を模式的に示したものである。心尖部から超音波

を送受信することによりイメージングを行った。図7(b)は、球面拡散送信超音波ビームおよび異なる角度で形成した多数の受信集束ビームを用いることにより得られた左心室のBモード断層像である。

心臓壁からの超音波エコーは、血球からの微弱なエコーに比べ振幅が大きいので、血球からのエコーを強調する必要がある。本研究では、超音波 RF 信号に時間方向の高域通過フィルタを適用することにより血球からの微弱なエコーを強調した。血球からのエコー信号(RF 信号)に、相互相関関数を用いたスペクトルトラッキング法を適用することにより血流速度ベクトルの推定を行った結果が図7(c)である。図7(c)では、血流速度の大きさをホットスケールおよび矢印の長さで、血流の方向を矢印の方向で示している。本研究では、相互相関関数を時間方向に僅か 2 ms 程度平均することにより雑音の影響を低減し、血流速度ベクトルの推定誤差を半減できることを示している。図7(c)は、心臓拡張期において左心室内に血液が流入するタイミングであり、左心室に流入した血液が渦を巻いている様子が確認できる。このように、本手法は循環器系の動態を高精度に計測し、心機能等を評価するために大変有用である。

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 16 件)

(1) H. Hasegawa and H. Kanai, "Effect of element directivity on adaptive beamforming applied to high frame rate ultrasound," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 62, no. 3 (2015) 511-523 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2015.006973>

(2) H. Hasegawa and H. Kanai, "Effect of sub-aperture beamforming on phase coherence imaging," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 61, no. 11 (2014) 1779-1790 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2014.006365>

(3) Y. Nagai, M. Cinthio, H. Hasegawa, M. Bengtsson, M. Evander, J. Albinsson, and H. Kanai, "In vitro experiment using porcine artery for evaluation of ultrasonic measurement of arterial luminal surface profile," Journal of Medical Ultrasonics, vol. 41, no. 4 (2014) pp. 431-437 (査読有).

10.1007/s10396-014-0541-0

(4) H. Hasegawa and H. Kanai, "Comparison of spatial resolutions of parallel beamforming and diffraction tomography in high frame rate echocardiography," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53 (2014), pp. 07KF02-1-07KF02-3 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.07KF02>

(5) H. Takahashi, H. Hasegawa, and H. Kanai, "Echo speckle imaging of blood particles with high-frame-rate echocardiography," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53 (2014), pp. 07KF08-1-07KF08-7 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.07KF08>

(6) Y. Fujita, H. Tagashira, H. Hasegawa, K. Fukunaga, and H. Kanai, "Ultrasonic visualization of propagation of myocardial vibration driven by electrical excitation of myocardium of rat in ex vivo experiment," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53 (2014), pp. 07KF25-1-07KF25-7 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.07KF25>

(7) Y. Nagai, H. Hasegawa, and H. Kanai, "Improvement of accuracy in ultrasonic measurement of luminal surface roughness of carotid arterial wall by deconvolution filtering," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53 (2014), pp. 07KF19-1-07KF19-9 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.07KF19>

(8) K. Nakahara, H. Hasegawa, and H. Kanai, "Optimization of feature extraction for automated identification of heart wall regions in different cross sections," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53 (2014), pp. 07KF09-1-07KF09-9 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.07KF09>

(9) M. Sato, H. Hasegawa, and H. Kanai, "Correction of change in propagation time delay of pulse wave during flow-mediated dilation in ultrasonic measurement of arterial wall viscoelasticity," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53 (2014), pp. 07KF03-1-07KF03-6 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.07KF03>

(10) K. Tachi, H. Hasegawa, and H. Kanai, "Measurement of shear viscoelasticity by continuous-wave ultrasound using dual acoustic radiation pressure," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53 (2014), pp. 07KF17-1-07KF17-6 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.07KF17>

(11) D. Asari, H. Hasegawa, and H. Kanai, "Improvement of myocardial displacement estimation using subkernels for cross correlation between ultrasonic RF echoes," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53 (2014), pp. 07KF21-1-07KF21-7 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.07KF21>

(12) H. Hasegawa and H. Kanai, "Expanding aliasing limit in measurement of tissue velocity using autocorrelation method," Journal of Medical Ultrasonics vol. 41 (2014), pp. 151-153. 10.1007/s10396-013-0496-6 (査読有).

(13) H. Takahashi, H. Hasegawa, and H. Kanai, "Improvement of automated identification of the heart wall in echocardiography by suppressing clutter component," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 52 (2013), pp.

07HF017-1-07HF017-7 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.52.07HF17>

(14) S. Kageyama, H. Hasegawa, and H. Kanai, "Increasing bandwidth of ultrasound radio frequency echoes using Wiener filter for improvement of accuracy in measurement of intima-media thickness," Japanese Journal Applied Physics, vol. 52 (2013), pp. 07HF04-1-07HF04-7 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.52.07HF04>

(15) N. Ibrahim, H. Hasegawa, and H. Kanai, "Detection of arterial wall boundaries using an echo model composed of multiple ultrasonic pulses," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 52 (2013), pp. 07HF03-1-07HF03-10 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.52.07HF03>

(16) A. Ponnle, H. Hasegawa, and H. Kanai, "Suppression of grating lobe artifacts in ultrasound images formed from diverging transmitting beams by modulation of receiving beams," Ultrasound in Medicine and Biology, vol. 39 (2013), pp. 681-691 (査読有).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2012.10.019>

〔学会発表〕(計 13 件)

(1) 長谷川英之, 金井 浩, "高速超音波イメージングにおける空間分解能向上のための適応ビームフォーマの改良," 第 35 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2014 年 12 月 3 日~5 日, 明治大学, 東京.

(2) 長谷川英之, 金井 浩, "高速超音波イメージングと循環系動態計測," 第 17 回日本栓子検出と治療学会, 2014 年 10 月 4 日~5 日, 福岡大学, 福岡.

(3) 長谷川英之, 金井 浩, "頸動脈における脈波伝播の高速超音波イメージング," 電子情報通信学会超音波研究会, 2014 年 9 月 29 日, 山形大学, 山形.

(4) H. Hasegawa and H. Kanai, "Phase coherence factor with sub-aperture beamforming," 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2014 年 9 月 3 日~6 日, Chicago, USA.

(5) H. Hasegawa and H. Kanai, "High frame rate ultrasound for measurement of cardiovascular dynamics," 7th World Congress of Biomechanics, 2014 年 7 月 6 日~11 日, Boston, USA.

(6) H. Hasegawa and H. Kanai, "High frame rate ultrasonic imaging for measurement of tissue dynamics," 第 53 回日本生体医工学大会, 2014 年 6 月 24 日~26 日, 仙台国際センター, 仙台.

(7) 長谷川英之, 金井 浩, "高速イメージングによる定量計測," 日本超音波医学会第 87 回学術集会, 2014 年 5 月 9 日~11 日, パシフィコ横浜, 横浜.

(8) 長谷川英之, 金井 浩, "Phase coherence factor と開口分割による高速超音波イメージングの高空間分解能化," 日本超音波医学会第 87 回学術集会, 2014 年 5 月 9 日~11 日, パ

シフィコ横浜, 横浜.

(9) 長谷川英之, 金井 浩, "並列ビーム形成法と回折トモグラフィ法の空間分解能の比較," 第 34 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2013 年 11 月 20 日~22 日, 同志社大学, 京都.

(10) H. Hasegawa and H. Kanai, "Displacement estimation of arterial wall from multiple directions by utilizing diverging transmit beam for synthetic aperture ultrasound imaging," IEEE UFFC, EFTF and PFM Symposium, 2013 年 7 月 21 日~25 日, Prague, Czech Republic.

(11) 長谷川英之, 金井 浩, "動脈壁の局所弾性特性の超音波測定," 日本超音波医学会第 86 回学術集会, 2013 年 5 月 24 日~26 日, 大阪国際会議場, 大阪.

(12) 長谷川英之, 佐藤雄治, 金井 浩, "開口の前方に設定した仮想点音源の走査による心臓断層法の高速度化," 日本超音波医学会第 86 回学術集会, 2013 年 5 月 24 日~26 日, 大阪国際会議場, 大阪.

(13) H. Hasegawa, Y. Sato, and H. Kanai, "High frame rate echocardiography using virtual point source moving in front of array," 32nd International Acoustical Imaging Symposium, 2013 年 4 月 29 日~5 月 1 日, Singapore, Singapore.

〔図書〕(計 1 件)

(1) H. Hasegawa and H. Kanai, Ultrasonic Methods for Measurement of Small Motion and Deformation of Biological Tissues for Assessment of Viscoelasticity, ASME Press, 2014, 1-45.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/hkanai/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 英之 (HASEGAWA, HIDEYUKI)

東北大学・大学院医工学研究科・准教授

研究者番号: 00344698