

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12826

研究課題名（和文）フレキシブルアレイセンサにおける変形形状の推定および画像化

研究課題名（英文）Shape Estimation and Imaging with Flexible Ultrasonic Array Sensors

研究代表者

田邊 将之（Tanabe, Masayuki）

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・助教

研究者番号：00613374

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超音波フレキシブルプローブを生体にフィットさせた状態で画像化を行う際、プローブの変形によってビームフォーミングを正しく行えなくなるという問題を解決するために、超音波の直達波を利用してプローブの形状推定を行う方法を提案した。また、フレキシブルな超音波アレイプローブの製作および画像化に成功した。当初は素子間隔の広さに起因する画像劣化を信号処理で補完する予定であったが、アレイプローブの素子を緻密に配列することで解決した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在市販されている医用超音波プローブは変形することができず、例えば膝軟骨や指などの固くて湾曲した部位では、プローブと生体の接触面積が小さく、可視化が困難であった。また、乳房などにおいては全体が大きく変形するため、他のモダリティとの比較が困難であった。今回提案した手法によって、フレキシブルプローブを使用した際の画像の歪みを補正することで、対象部位を正確に観察することの目処が立った。長年大きな変化のなかった超音波プローブにおいて新しい形を提案することができ、今後医用超音波画像診断において新たな用途の創出が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, a method for estimating the shape of the probe using direct ultrasound waves was proposed to solve the problem that beamforming cannot be performed correctly due to deformation of the probe when imaging with the ultrasound flexible probe fitted to the living body.

In addition, a flexible ultrasonic array probe has been successfully fabricated and imaged. Initially, it was planned to compensate the image degradation caused by the wide element spacing with signal processing, but this was solved by arranging the elements of the array probe in a dense array.

研究分野：医用超音波

キーワード：超音波 フレキシブル センサ 画像化

1. 研究開始当初の背景

医用超音波プローブには超音波を送受する圧電素子が 100 個以上組み込まれておりこの圧電素子の素材には一般的に鉛系の PZT が用いられている。作成方法は材料を混合した後に約 1,000°C で焼き固め所望のサイズにカットする方法が主流である。実際には焼き固めた後格子状に溝を掘りそこにエポキシ樹脂を充填することで実用上の感度を向上させていることが多いがそれでも曲げには弱く実際に使用する際にも曲げて使用することは想定されていない。申請者を含む研究グループはゾルゲルコンポジットスプレー法（以下 SCS 法）と呼ばれる独自の圧電素子を開発している。本手法はゾルゲル溶液とバルク粉体の混合物をスプレー塗布し熱処理を施すことにより微細な空孔を多数内包した圧電膜を作成することが可能となる。SCS 法はいくつかの特徴を有している。

- セラミック素材なのに柔軟性が高い（図 1）。
- 曲面にセンサを作成できる（図 2）。
- BiT などの分極が難しい材料も多孔質な状態では分極可能になり 600°C 以上で使用可能な圧電素子を作成できる。

これらのうち、本研究では柔軟性に着目した。これまで SCS 法を用いて感圧センサや非破壊検査医療における潜在的なニーズに適応した様々な次世代型の圧電体を目指して研究を行ってきた。特に医用超音波分野で期待できる利用例として膝内部の軟骨や指乳房を対象にしたイメージングが挙げられる。既存のプローブで膝軟骨や指先などの硬くて湾曲した部位を可視化しようとするプローブと生体の接触面積が小さく可視化が困難となる。また乳房などの柔らかい部位にプローブを当てると生体の形状が大きく変形した状態で可視化を行うため痛みを伴うことがあるだけでなく X 線や MRI など他のモダリティで得られた画像との整合が困難となり生検や手術の際に部位の特定が難しくなる。上記のようなシチュエーションにおいてフレキシブルプローブによって可視化ができるようになることは非常に価値がありでありその実現が望まれている。

しかしフレキシブルプローブを用いた画像化を実現するためには二つの課題が残されている。一つは変形したプローブを用いてどのように超音波を送受し画像化を行うのかもう一つは現状のピッチ幅の広い素子を用いて画像化した際に生じる虚像（グレーティングローブ）をどのように抑制するかである。



図 1：変形させた SCS 圧電体

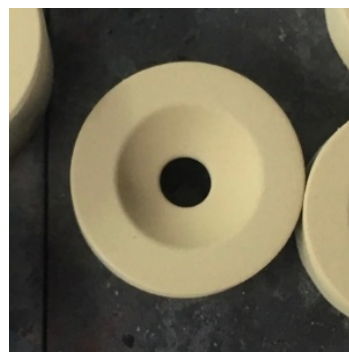


図 2：凹状 SCS 圧電体

2. 研究の目的

本研究は、広ピッチなフレキシブルプローブを用いて超音波を送受し、圧縮センシングおよび機械学習によって超音波画像の再構成を目指す。フレキシブルなアレイプローブ自体が市場にほとんど存在しておらず、工業用で製品化されているとあるプローブも、プローブがフラットであると仮定して描画しているのが現状である。今後はストレッチ可能なプローブなど、さらなる発展が期待されている中、画像化に関しては十分な検討がされておらず、幅広い応用が期待できる。

3. 研究の方法

点状あるいは平面状の超音波を照射し対象からの反射エコーを各素子で受信するプロセスを複数箇所で行った後、送信ビームと受信ビームを仮想的に構築し各部位における輝度を計算する。この時、作成された画像のボケをコスト関数に設定し、ボケが最小になるよう仮想ビームを設定すればよい。しかし、このままでは計算量が膨大になり準リアルタイムで解くことができない。そこで、他に得られる情報を用いて計算量の削減を行う。例えば、プローブが変形した状態では送信波を直接受信することがある（図 3）。この直達波の有無のみを検知するだけで、どの凹状に変形している部位を特定することができる。また、その直達波を解析することで曲率もあ

る程度推定可能であり、計算コストを削減することが可能となる。さらに、プローブの変形の仕方や曲率については制限があること、生体内部は概ね一様媒質として近似できることを考慮することで、計算精度を高めることができる。

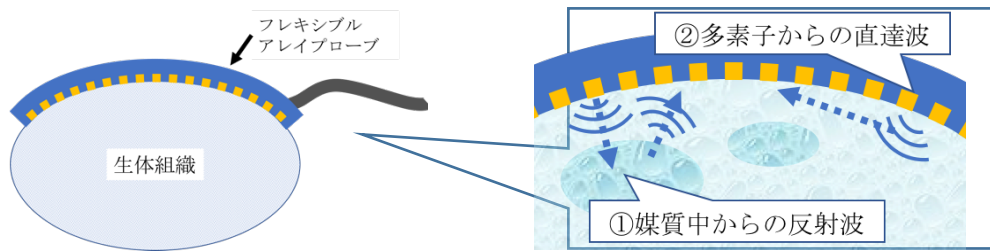


図3：フレキシブルプローブのイメージと超音波の各素子からの伝搬イメージ

4. 研究成果

超音波フレキシブルプローブを生体にフィットさせた状態で画像化を行う際、プローブの変形によってビームフォーミングを正しく行えなくなるという問題を解決するために、超音波の直達波を利用してプローブの形状推定を行う方法を検討した。また、素子ピッチが大きいプローブで画像化を行った際の画像劣化を抑制する手法についても研究を行った。その結果、昨年度に提案したフレキシブルプローブの形状推定方法を拡張し、超音波の送信回数を増やすことでより精度の高い形状推定を行うことに成功した。また、圧縮センシングを用いて、素子間隔の広さによって生じるグレーティングローブを抑制するためのビームフォーミング信号処理について基礎検討を引き続き行い、評価実験を行った。その結果、概ね照射超音波の波長以下の誤差で推定することができた。(図4)

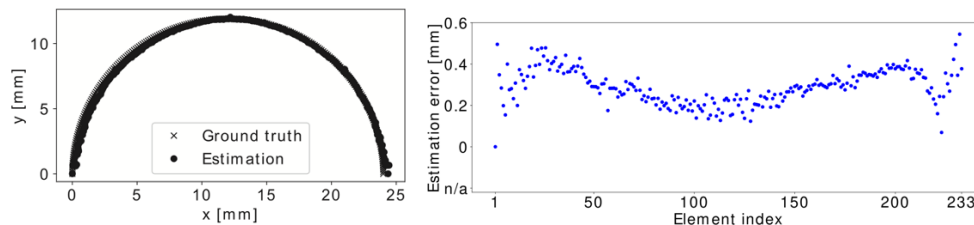


図4：超音波プローブの形状推定結果。(a)プローブ形状および(b)誤差

素子間隔の広く素子数の少ないアレイセンサを用いた時の画像劣化を、圧縮センシングを用いることで解像度向上を図ったが、目標達成には至らなかった。一方で、フレキシブルなアレイプローブの製作に成功した(図5)。当初は素子間隔の広さを信号処理で補完する予定であったが、アレイプローブの素子を緻密に配列することが可能となり、その必要性が下がった。そのため、信号処理はプローブの形状を推定するのみでよくなり、リアルタイム性が確保できることとなった。製作したプローブのひとつは、PZT層の厚みは約0.1 mm、素子数64、幅0.75 mm、隙間0.25 mm、ピッチ1 mm、高さ3 mmとした。d33は約40 pC/N、中心周波数約4 MHz、周波数帯域幅約4 MHzとなった。基礎的な生体実験を行い、深度4 cm程度の生体部位の可視化ができた。複数の形状のセンサを作成し、それらの中で最小の素子ピッチは0.5 mmとなった。今後、このセンサを適用可能なニーズを調べた上で、実証実験を実施する予定である。



図5：フレキシブル超音波プローブ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sada Miki, Tanabe Masayuki	4. 巻 59
2. 論文標題 Preliminary study of self-shape estimation of ultrasonic flexible probe using direct waves among elements for medical ultrasound imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SKKE25 ~ SKKE25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab918f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Shun Fukushima, Masayuki Tanabe
2. 発表標題 Strategic Lateral Undersampling with Weighted Filtered Delay Multiply And Sum Beamforming
3. 学会等名 The 41th Symposium on Ultrasonic Electronics（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shota Yoshisue, Masaki Tanabe
2. 発表標題 Basic Study on Image Degradation by Lateral Spatial Undersampling and Its Compensation
3. 学会等名 The 41th Symposium on Ultrasonic Electronics（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kakeru Matsuyama, Masayuki Tanabe
2. 発表標題 A Study on Transmission Method for Shape Estimation of Ultrasonic Flexible Probe
3. 学会等名 The 41th Symposium on Ultrasonic Electronics（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Miki Sada, Masayuki Tanabe
2. 発表標題 Self Shape Estimation of Ultrasound Flexible probe using Direct Waves Among Elements
3. 学会等名 The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayuki Tanabe
2. 発表標題 Effect of Receive Aperture Size on Image Quality of Filtered Delay Multiply and Sum Beamforming
3. 学会等名 The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shibuki Yamasaki, Masayuki Tanabe
2. 発表標題 Fundamental Evaluation of Weighted Filtered Delay Multiply and Sum Beamforming
3. 学会等名 The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayuki Ishii, Masayuki Tanabe, and Makiko Kobayashi
2. 発表標題 Fabrication of Two-Dimensional Sparse Array Probe Based on Sol-gel Composite Spray Technique
3. 学会等名 The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shota Yoshisue and Masaki Tanabe
2. 発表標題 A Study on Lateral Resolution Improvement of a Wide Pitch Probe by Compressed Sensing
3. 学会等名 The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki Nishida, Masayuki Ishii, and Masayuki Tanabe
2. 発表標題 Improvement in Spatial Resolution of a Two-Dimensional Sparse Array Probe by Mechanical Scanning
3. 学会等名 The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------