

形状センシングと深層学習を相補的に用いた フレキシブル超音波イメージングの開発

国立研究開発法人 産業技術総合研究所健康医工学研究部門 主任研究員 津村 遼介 *

1. はじめに

従来の超音波（US）プローブと比較して、柔軟なフレキシブル超音波プローブ（トランスデューサ）に注目が集まっている^[1]。従来の超音波プローブでは、診断画像の取得が操作者に大きく依存するため、臨床現場で使用するには熟練した技術と広範な訓練が必要となる。さらに、従来のトランスデューサは身体に接触するために硬い構造となっており、接触圧や位置の変化により、毎回異なる解剖学的変化が生じる可能性がある。一方で、柔軟な超音波トランスデューサは皮膚にフィットする特性を持ち、さまざまな部位に適応可能で、操作者依存の課題に対応する可能性がある。

Bモード画像は、超音波エコーを表す輝点で構成された2次元超音波画像であり、超音波検査で一般的に使用される。柔軟な超音波トランスデューサでBモード画像を生成するには、その形状を正確に取得する必要がある。Delay-and-Sum（DAS）ビームフォーミングは、無線周波（RF）データから超音波画像を再構成する際に最も広く利用されているアルゴリズムである^[2]。DASでは、各素子と再構成したい画素との間の伝播時間（ToF）を正確に計算するために、トランスデューサの形状情報が必要である。従来の硬いトランスデューサでは素子の位置が固定されているため、計算は幾何学的に定義されている。しかし、柔軟なアレイトランスデューサでは身体表面との接触に応じて形状が変化する。トランスデューサの形状を正確に定義できていない場合、DASビームフォーミングでRFデータに誤った遅延が適用され、再構成された画像に重

大なぼやけや歪みが生じる。そのため、柔軟な超音波トランスデューサによる画像再構成には、正確な形状推定技術が不可欠である。

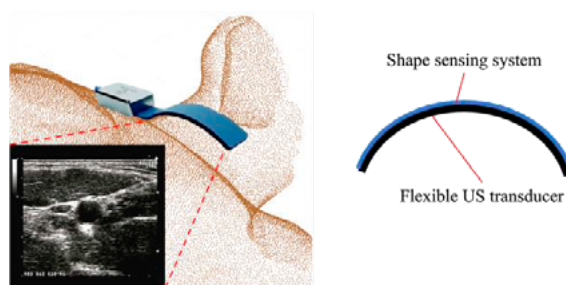


Fig. 1 Conceptual illustration of flexible ultrasound imaging system.

前述のように、形状センシングにはいくつかの手法が存在する。柔軟な超音波トランスデューサは大きく変形するため、形状センシングは困難である。また、臨床現場での使用を想定して、形状センシングのシステムはコンパクトでシンプルである必要がある。最近の研究では、静電容量差を利用したマルチベンド型形状センサが提案されており、高精度な形状計測が可能であることが示されている^[3]。このセンサは、内層と外層に埋め込まれた静電容量センサ間の相対的な変位に着目することで、局所的な曲率を計測し、形状を一連の接続された弧としてモデル化する。このセンサは、大きな変形にも対応可能で、良好な線形性が保証されており、その小さなフットプリントにより他の応用への統合が容易である。そのため、静電容量差を用いた形状センサは、柔軟な超音波トランスデューサと高い互換性を持つと考えられる。柔軟な超音波トランスデューサへのセンサ統合に際しては、センシング精度およびロバスト性をさらに

*（助成採択時） 国立研究開発法人 産業技術総合研究所健康医工学研究部門 研究員

向上させる必要がある。さらに、超音波トランスデューサに許容されるフットプリントが限られているため、センサ構成を最適化して収まるようにする必要がある。

本研究では、柔軟なアレイトランスデューサによる高精度な超音波画像再構成のために、静電容量差を用いた形状センシングを提案する。最終的には、[Fig. 1](#) に示すように、柔軟な超音波トランスデューサ上に形状センシングシステムを組み込み、首などの身体形状に応じてリアルタイムに超音波画像を再構成するオールインワンシステムを構築する予定である。

2. 手法

2.1. 幾何学モデル

静電容量差を利用した形状センシングシステムは、両端が固定された2本のストリップから構成されており、内側と外側のストリップに埋め込まれた静電容量センサ間の相対的なずれに着目している。システムがある曲率半径で曲がると、2本のストリップの間にずれが生じる。

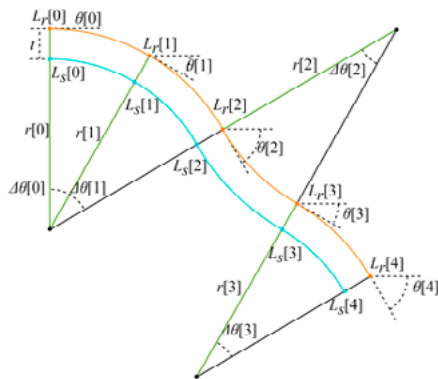


Fig. 2 Definition of estimated parameters with shape sensing system.

このずれを複数の点で計測することで、全体の形状の曲率を推定する。

[Fig. 2](#) に示すように、まず半径が異なる2つの円弧 L_r および L_s を考える。任意のセクション n における各円弧の長さ $\Delta L_r[n]$ 、 $\Delta L_s[n]$ および中心角 $\Delta \theta[n]$ は以下のように定義される：

$$\Delta L_r[n] = L_r[n+1] - L_r[n] \quad \text{Eq.(1)}$$

$$\Delta L_s[n] = L_s[n+1] - L_s[n] \quad \text{Eq.(2)}$$

$$\Delta \theta[n] = \theta[n+1] - \theta[n] \quad \text{Eq.(3)}$$

L_r と L_s の半径をそれぞれ r および $r-t$ とすると、式 (1) は次のように変形される：

$$\Delta L_r[n] = r[n] \Delta \theta[n] \quad \text{Eq.(4)}$$

$$\Delta L_s[n] = (r[n] - t) \Delta \theta[n] \quad \text{Eq.(5)}$$

このとき、円弧の半径 $r[n]$ は以下の式で表される：

$$r[n] = \frac{t \Delta L_r[n]}{\Delta L_r[n] - \Delta L_s[n]} \quad \text{Eq.(6)}$$

また、三角関数の定理を用いることで、中心角 $\Delta \theta[n]$ は次のように求められる：

$$\Delta \theta[n] = \frac{\Delta L_r[n] - \Delta L_s[n]}{t} \quad \text{Eq.(7)}$$

したがって、2つの円弧長の差 $\Delta L_r[n] - \Delta L_s[n]$ を測定することで、物体の中心角 $\Delta \theta[n]$ を取得することができる。複数点において測定された曲率半径 $r[n]$ および中心角 $\Delta \theta[n]$ から、物体の形状は一連の円弧として表現される。

2.2. 差動容量測定

中心角 $\Delta \theta[n]$ を測定するために差動容量の変化が使用される。円弧 L_r には RX1 および RX2 の2つの電極が、円弧 L_s には TX 電極が配置される。各電極間の距離 d は、RX1-TX および RX2-TX の2つの容量から算出され、[Fig. 3](#) に

示すようにこの距離 d から円弧長差 $\Delta Lr[n]$ - $\Delta Ls[n]$ が求められ、最終的に物体形状が推定される。



Fig. 3 Mechanisms of differential capacitance occurrence due to the local shift of two layers.

2.3. 電極設計

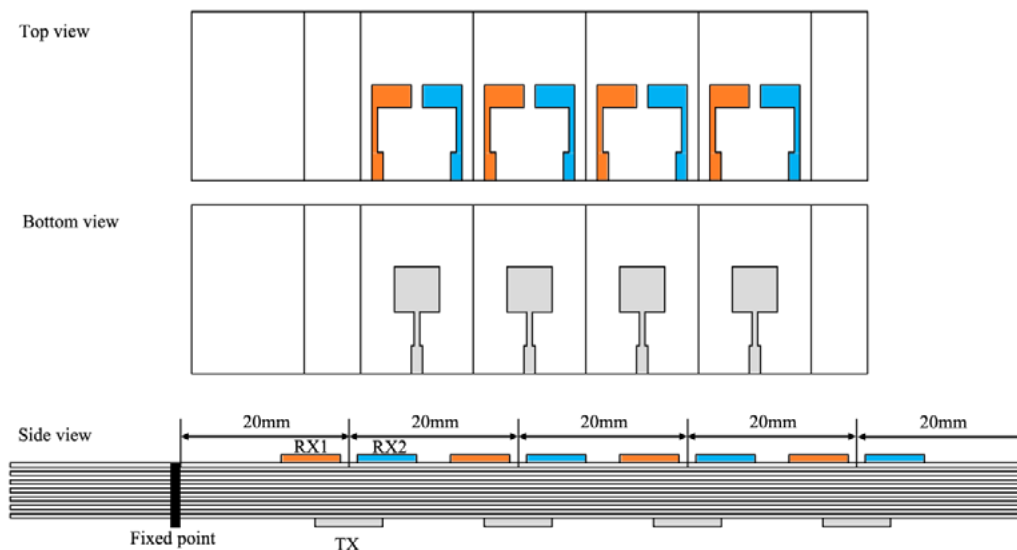


Fig. 4 Detailed layout of the electrodes on the shape sensing system.

[Fig. 4](#) は設計された電極を示している。4 対の電極が 20mm 間隔で配置され、各点で差動容量が測定される。電極層の間に適切な厚さの紙をスペーサーとして挿入することで、層間の距離を維持しつつセンサの柔軟性を保っている。

本研究では、[Fig. 5](#) に示すように異なるサイズの 2 種類の電極パターンが試作された。大きな電極面積は容量の増加を可能にし、寄生容量の影響を低減することで測定精度の向上が期待される。

一般に静電容量 C は、電極面積 S 、電極間距離 d 、誘電率 ε を用いて次の式で表される：

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad \text{Eq.(8)}$$

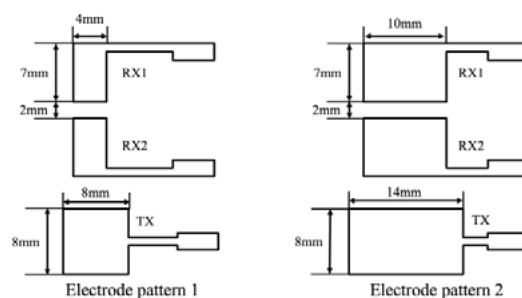


Fig. 5 Utilized electrode patterns

したがって、電極面積を増加させることで容量が増加し、誤差の影響を抑えることができる。また、センサの基板には折り曲げ剛性の高い紙を使用しており、その表面にシリコンオイルを塗布している。シリコンオイルは紙の層間や空隙に浸透し、静電容量を増加させるとともに、

層間の分離を抑制する分子間力を強化する効果が期待される。

2.4. システム構成

Fig. 6 は開発したプロトタイプを示している。静電容量の測定には静電容量-デジタル変換器 (AD7745、Analog Devices) が使用されている。4 点の差動容量を同時に測定するために、容量マルチプレクサ (TC4052BP、東芝) が使用されている。また、Arduino UNO がマイコンとして、マルチプレクサの制御および容量データの取得・PC への送信を行っている。

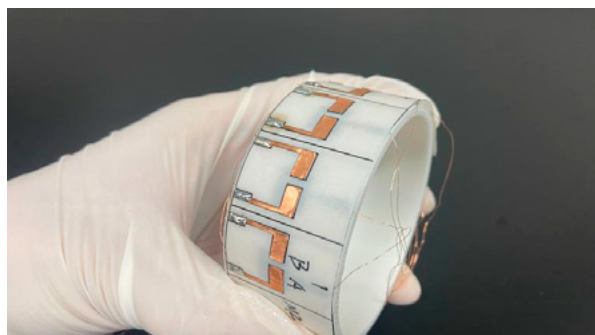


Fig. 6 Overview of developed prototype shape sensing system

各推定パラメータの計算は、マイコンから送信された測定データを元に、Java で作成されたカスタムプログラムによりホスト PC 上で行われている。システム全体の構成を Fig. 7 に示す。

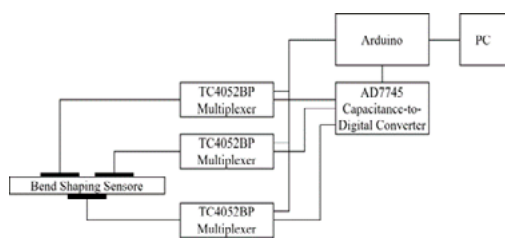


Fig. 7 Whole system architecture for measuring

3. 形状センシング精度評価

3.1. 実験方法

本実験では、開発した形状センシングシステ

ムの精度を、既知の形状を持つ物体を用いて評価した。センサ上に 1mm 間隔で配置された 80 点において、推定位置と実際の位置（グラウンドトゥールズ）とのユークリッド距離を計算し、これを推定誤差とした。実験条件としては、シリコンオイルの有無、電極の大小という 2 つの要素で比較を行った。測定対象として、直径が 40mm から 100mm の 7 種類の円柱物体を用意した。各条件下で 3 回の試行を行い、各測定前にはキャリブレーションを実施した。キャリブレーションでは、全ての対象物を測定し、それらに対して一次近似を行った。

3.2. 実験方法

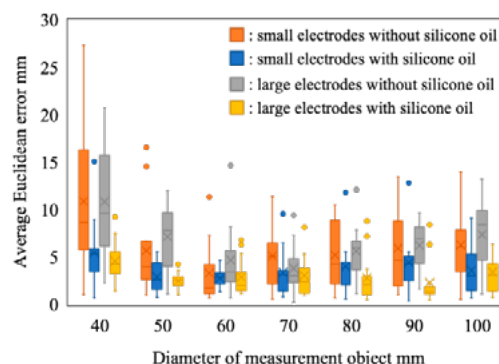


Fig. 8 Result of the shape sensing error comparing small and large electrodes with and without applying the silicone oil.

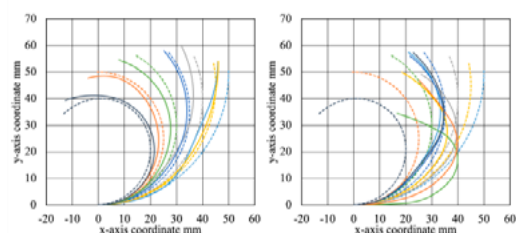


Fig. 9 Representative cases of the shape sensing: (left) the best case of large electrode with silicone oil and (right) the worst case of small electrode without silicone oil. Solid and dot lines represent the measured shape and theoretical shape.

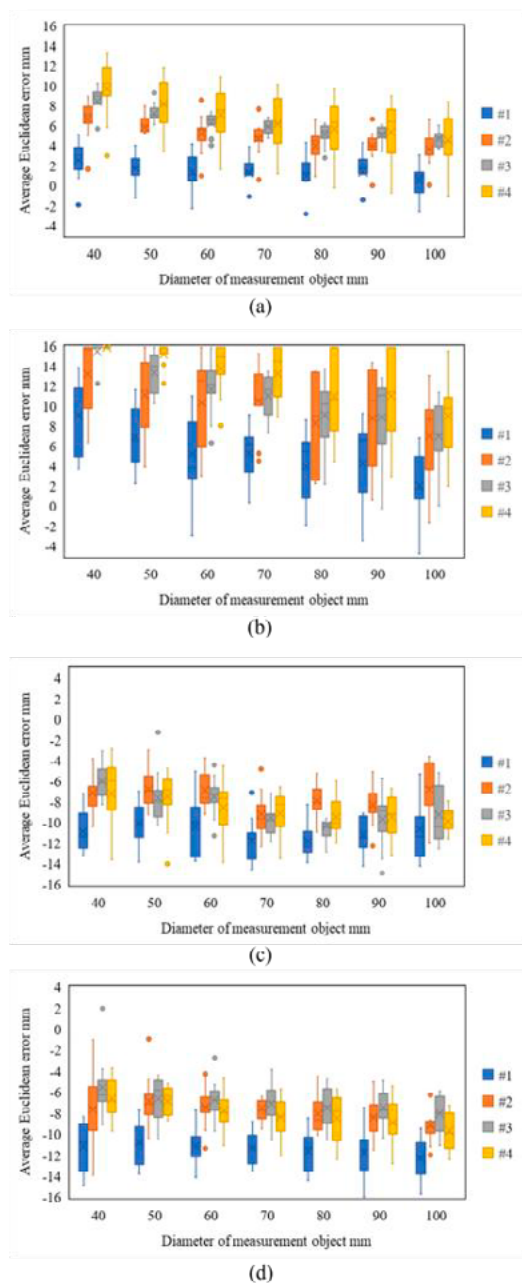


Fig. 10 Measured capacitance in each electrode at 4 points: (a) large electrode without silicone oil, (b) large electrode with silicone oil, (c) small electrode without silicone oil, and (d) small electrode with silicone oil. Noted that #1-#4 represents the number of each embedded sensor.

[Fig. 8](#) には、シリコンオイルの有無および電極サイズ（小・大）による形状センシング誤差の

ボックスプロットを示している。

[Fig. 9](#) は、全条件における最良および最悪の形状センシング結果の代表例である。

[Fig. 10](#) には、各電極における測定された静電容量の生データを示している。

シリコンオイルの有無で比較した場合、小電極においては推定誤差が平均 46.1%、最大で 66.8%改善され、大電極では平均 52.8%、最大 67.2%の改善が見られた。また、シリコンオイルを適用した条件下で大小の電極を比較した場合、大電極において平均 10.4%、最大 35.8%の推定誤差の改善が確認された。さらに、小電極と大電極間での静電容量を比較すると、大電極の平均容量は小電極の約 2.38 倍であった。

4. 超音波画像評価

4.1. 実験方法

前節では、さまざまな曲率形状を用いて開発したセンサの評価を行った。しかし、そこで生じたセンシング誤差が超音波画像の再構成品質にどのような影響を与えるかは明らかではない。そこで本節では、センシング誤差が超音波画像再構成に与える影響を、US（超音波）シミュレーションを用いて調査した。

シミュレーションには、Matlab 上で動作する Field II シミュレータを使用した。シミュレーションで使用した柔軟な超音波トランスデューサは、1mm ピッチで配置された合計 80 個の素子から構成されており、素子サイズは 0.8mm × 10mm である。各素子の位置は、トランスデューサがある曲率で上向きに凸状に曲がった際の位置に設定されている。このシミュレーションで使用した曲率半径は、前回の実験と同様に 7 種類（40、50、60、70、80、90、100mm）である。さらに、それぞれの曲率において最適な条件

(シリコンオイル塗布+大サイズ電極)で得られたセンシング誤差に基づいて、各素子の位置をシフトさせている。

送信信号としては、3 MHz のガウス窓付き 1 サイクル正弦波バーストが使用され、サンプリング周波数は 40 MHz とした。音速はシミュレーション中、1540 m/s と仮定している。再構成には、DAS (Delay-and-Sum) とコヒーレンスファクタ (Coherence Factor) を組み合わせたビームフォーミング手法を用いた。これは、センシング誤差に起因するサイドローブやノイズを抑制する目的である。全ての画像には、ヒルベルト変換を用いた包絡線検出を行い、得られたラインは正規化および対数圧縮されて最終画像が形成される。

可視化対象としては、[Fig. 10](#) (a)に示すように 4 つの点ターゲットを配置した。点ターゲットを用いたビームフォーミングの品質評価として、以下の式により SNR (信号対雑音比) を測定した：

$$SNR = 20 \log_{10} \left\{ \frac{|A_{Max}|}{\sigma_{noise}} \right\} \quad \text{Eq.(9)}$$

ここで、 A_{max} は各点ターゲットでのピーク信号振幅、 σ_{noise} はサイドローブの影響を受けないノイズ領域での画素振幅の標準偏差である。さらに、点ターゲットを用いてビームフォーミングの解像度を評価するために、FWHM も算出した。SNR および FWHM は、深さ 20mm に配置された点ターゲットの中心にて評価を行った。

4.2. 画像再構成への影響

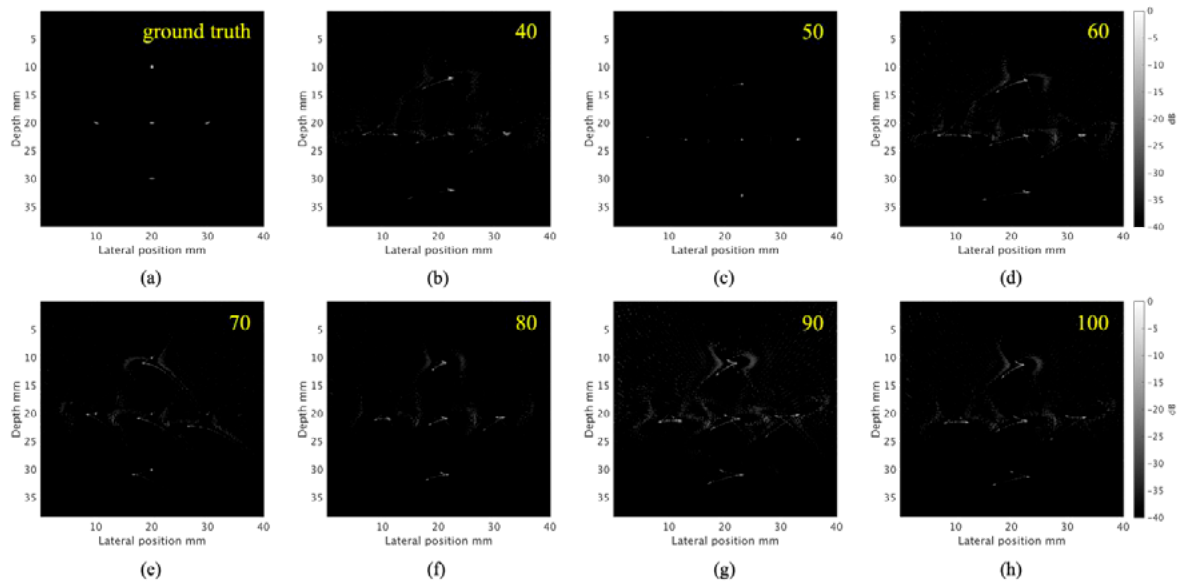


Fig. 11 Simulated US images reconstructed with the shape sensing error in each radius: (a) the ground truth case and the cases with the sensing errors in the radius of (b) 40 mm, (c) 50 mm, (d) 60 mm, (d) 70 mm, (d) 80 mm, (d) 90 mm, and (h) 100 mm.

Fig. 11 (b) ~ (h) は、各曲率半径においてセンシング誤差の影響を受けた再構成画像の結果を示している。Table 1 には、SNR、FWHM、およびそれに対応するセンシング誤差の結果を示している。ここでの誤差は、80 測定点における平均値と標準偏差を意味する。結果から、センシング誤差に応じて点ターゲットがぼやける（ピントが合わない）ことが示された。最悪のケースでは、曲率半径 70mm の条件において、全ての点ターゲットが二重に表示されるほど明確にぼやけていた。一方で、誤差が小さい条件下でも、点ターゲットの位置がわずかにずれて表示されることが確認された。また、評価された画像指標（SNR および FWHM）とセンシング誤差との間には明確な相関関係は見られなかった。

Table 1 Evaluated Image Metrics

	Curvature radius						
	mm						
	40	50	60	70	80	90	100
SNR							
dB	15.55	18.4	20.35	18.15	21.25	24.19	22.56
FWHM							
mm	4.94	7.7	0.59	0.26	1.77	0.69	8.48
sensing							
error	1.91	1.99	1.13	3.50	2.63	3.23	2.19
mm	±1.65	±1.94	±0.68	±3.98	±1.29	±1.54	±1.01

5. 考察

5.1. 絶縁性液体

シリコンオイルの浸透により、紙内部の空隙や層間の空気層が置き換えられ、誘電率が向上した。その結果、静電容量が増加し、測定精度の向上につながったと考えられる。さらに、シリコンオイルの表面張力により、曲率が大きくなった際の層の剥離が抑制され、測定円の直径

が小さい約 40mm 付近での測定精度向上に寄与したと考えられる。シリコンオイルよりも高い誘電率を持つ液体や、液体の浸透を促す高い多孔性を持つ材料を使用することで、さらなる精度向上が期待できる。

5.2. 電極デザイン

電極面積を増加させることによるセンサ性能の向上効果が確認された。一方で、電極面積を大きくしたことで差動容量が測定範囲を超えてしまい、逆に測定精度の向上が妨げられた。測定範囲内での計測を実現するために、電極の設置位置に応じてサイズを調整したり、最適な設計を行うことで、さらなる測定精度の向上が期待される。

5.3. 超音波イメージング

ある程度のセンシング誤差があっても、全ての条件下で点ターゲットは再構成画像として可視化された。一方で、誤差が大きい場合には、再構成画像において点ターゲットが二重に表示される（ダブルビュー）現象が確認された。また、比較的小さな誤差の条件においても、点ターゲットの可視化位置が真値からわずかにずれている場合があった。この結果から、センシング誤差は焦点位置のずれを引き起こすことが示唆される。

現在、センシング誤差の影響を補償するために、深層学習の敵対的生成ネットワークの一つの手法「Pix2Pix」を用いた手法を構築中である。これは推定誤差によってノイズが生じた再構成画像と正確に描写された画像をペアとして学習させる手法であり、今回の実験結果のような焦点位置のずれによるダブルビューなどを低減することが期待される。

6. 終わりに

本報告では、柔軟なアレイトランスデューサによる高精度な超音波画像再構成を目的として、静電容量差を用いた形状センシングシステムを提案した。開発したプロトタイプ形状センシングシステムについては、さまざまな形状の円柱体を用いて推定誤差の評価を行った。さらに、発生した誤差が超音波画像再構成に与える影響についてシミュレーションによって検討した。その結果、提案した形状センシングシステムが柔軟な超音波トランスデューサによる画像再構成に応用可能であることが示された。今後の研究では、開発したセンシングシステムを柔軟な超音波トランスデューサに統合し、臨床応用としての有効性を検証する予定である。

7. 参考文献

- [1] T. G. La and L. H. Le, “Flexible and Wearable

Ultrasound Device for Medical Applications: A Review on Materials, Structural Designs, and Current Challenges,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 2100798, (2021), pp. 1-19.

- [2] V. Perrot, M. Polichetti, F. Varray, and D. Garcia, “So you think you can DAS? A viewpoint on delay-and-sum beamforming,” *Ultrasonics*, vol. 111, (2021), pp. 1-12.

- [3] F. Shahmiri and P. H. Dietz, “ShArc: A Geometric Technique for Multi-Bend/Shape Sensing,” *Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - Proc.*, vol. 142, (2020), pp. 1-12.

8. 謝辞

本研究は島津科学技術振興財団の助成金によって実施したものである。ここに謝意を示す。