......

皮膚貼付型ウェアラブル超音波撮像装置の開発

Skin- attachable wearable ultrasound imaging device								
			2217008					
	研究代表者	東京大学	大学院工学系研究科	博士後期課程	野	\boxplus	拓	実

[研究の目的]

超音波を用いた生体内部の日常的なモニタリ ングは、疾患の早期発見・治療につながると期 待されている。しかし従来の超音波診断で用い られていた剛体の超音波プローブは、操作者が 手で診断部位に押し当てることによって密着さ せる必要があったため、長期的に計測し続ける ことは困難であった。そこで近年、薄く柔軟な シートに超音波素子を配列することによって作 製されたフレキシブル超音波プローブが注目さ れている。フレキシブルプローブは、体の表面 形状に合わせて柔軟に変形するため、皮膚に貼 り付けて密着させられる。

一方でフレキシブルプローブは、プローブの 変形に伴って内部に配列された超音波素子アレ イの形状が変化して分からなくなる。素子アレ イ形状の情報は超音波撮像における超音波の フォーカスに不可欠である。これまでにプロー ブ表面に光ファイバやマイクロ波センサなどを 取り付けて外部から素子アレイ形状を計測する 手法が考案されてきた。しかしこれらの手法で は、外部機器を取り付けることによってプロー ブが大型化・複雑化し、日常生活で使用するこ とが困難になるという課題があった。そこで外 部装置を用いずに RF データと呼ばれるプロー ブによって取得された超音波信号のみからフレ キシブルプローブの素子アレイ形状を推定する 様々な手法が提案されてきた。これらの手法で は、様々な素子アレイ形状を仮定して超音波撮 像を繰り返し行い.最も超音波画像の画質が高 くなる形状を探索する処理が用いられている。 この方法では1フレームごとに多数の超音波撮 像を繰り返す必要があり、フレームレートが非 常に低くなってしまう。超音波診断では生体内 部の臓器の動きの情報が重要であり、高いフ レームレートが求められる。

以上のことから本研究では、フレキシブル超 音波プローブの素子アレイ形状を高速に推定し. リアルタイムな超音波撮像を実現することを目 的とした。

[研究の内容, 成果]

提案手法

本研究ではフレキシブル超音波プローブに よって習得された RF データから深層ニューラ ルネットワーク (DNN: Deep Neural Network)を用いて素子アレイ形状を推定する手 法を開発した。DNN は、入力データと出力値 の関係を学習するために長い時間を要する一方 で、学習済みのモデルでは高速に推論を行える ため、リアルタイム性が求められる素子アレイ 形状推定に適していると考えられる。提案手法 の概要を図1に示す。はじめにフレキシブルプ ローブを体表面に貼り付けて RF データの計測 を行う。次に RF データを DNN に入力し, DNN は素子アレイ形状を決定するための形状



図1 DNN を用いた素子アレイ形状推定手法

パラメータを推論する。素子アレイ形状は形状 パラメータの各項を係数とする正弦級数であり, 後処理によって計算される。最後に出力された 素子アレイ形状に基づいて RF データから超音 波画像を再構成する。

シミュレーション実験による提案手法の評価

提案手法によるリアルタイムな素子アレイ形 状推定の実現可能性を検証するためにシミュ レーション実験を行った。DNN の学習と評価 を行うためのシミュレーションデータを 111.000 データ作成した。シミュレーションは 超音波が線形に伝播すると仮定して行い、シ ミュレーション空間に配置された散乱点に超音 波が入射すると等方的な散乱波が発生するモデ ルを用いた。実際の生体の計測データに基づい て、媒質中の音速は1500 m/s、減衰係数は0.5 dB/cm/MHz とした。様々なデータに対して 高精度な素子アレイ形状推定を実現するために は、非常に多様なデータを用いて DNN を学習 する必要がある。そこで本研究では、データご とに異なる自然画像から生成された散乱点分布 を用いた(図2)。素子アレイ形状についても 同様に多様なデータを用いて学習する必要が あったため、データごとにランダムに形状パラ メータを生成し、 そこから計算された素子アレ イ形状を用いた。

作成された 111,000 個のシミュレーション データの内, 110,000 データを DNN の学習, 1,000 データをテストに用いた。また学習デー



青点:自然画像を元に生成された散乱点分布。 赤線:超音波素子アレイ。

図2 シミュレーション例

タの 110,000 データは、ランダムに 100,000 データをトレーニングデータ、10,000 データを バリデーションデータに分割した。DNN モデ ルは DenseNet と呼ばれるモデルを基に作成し た。DenseNet は、各層の出力をそれ以降の層 に繰り返し入力する DenseBlock と呼ばれる構 造からなり、比較的少ないパラメータで複雑な 入出力関係を表現できるという特徴がある。 DNN の学習では形状パラメータの平均二乗誤 差をロス関数として用い、内部パラメータの更 新には学習率を 0.001 とした Adam オプティマ イザを用いた。また、DNN の学習と評価には CPU: Intel Xeon Gold 6230 と GPU: GeForce RTX 2080 Ti×4 を用いた。

上記の方法によって学習された DNN: DNN (sim)の性能は,推定された素子アレイ形状 の精度と,それを用いて再構成された超音波画 像の画質によって評価した。素子アレイ形状の 推定精度は正解形状と推定形状の素子アレイに おける各素子の座標の平均絶対誤差(MAE) によって評価した。超音波画像の画質は,正解 形状と推定形状を用いた再構成画像の平均構造 的類似度(MSSIM)によって評価した。また これらの評価指標は,提案手法の有効性を検証 するために,誤って素子アレイが直線形状であ ると仮定した場合や先行研究の超音波画像の画



図3 シミュレーション実験の結果例

質に基づいて繰り返し最適化を行う手法につい ても同様に算出し,DNN(sim)と比較した。

精度評価結果の3例を図3に示す。左から正 解,直線,先行研究,DNN(sim)の素子アレ イ形状を用いて再構成された超音波画像であり, 赤線は画像再構成に用いた素子アレイ形状を示 している。これらを比較すると,直線形状では 画像のぼやけや歪みが見られるのに対して,先 行研究やDNN(sim)では正解形状と同様の 画像が得られていることが分かる。

テストデータ 1,000 例に対する精度評価の結 果,素子座標の MAE は,直線形状が 4.46 mm, 先行研究が 3.00 mm, DNN (sim) が 0.80 mm となり,DNN (sim) の精度が最も高くなった。 再構成画像の MSSIM も同様に DNN (sim) が 最も高くなり,それぞれ 0.70, 0.73, 0.79 であっ た。また,推定に要した時間は先行研究が 10 分,DNN (sim) が 0.045 秒であった。これら の結果から,提案手法を用いることによってフ レキシブルプローブを用いたリアルタイムな超 音波撮像が実現される可能性が示された。

人を対象とする実験による提案手法の評価

上述のシミュレーション実験は超音波の線形 な伝播や均一な音速分布を仮定していたが,実 際の生体計測では非線形な超音波伝播や不均一 な音速分布が存在する。また,シミュレーショ ンにおける撮像対象の散乱点分布は自然画像を 元に生成しており,実際の生体とは異なる。そ こで提案手法を実際の生体計測に適用した際の 有効性を検証するために、人を対象とする実験 を行った。本実験は東京大学工学系研究科倫理 委員会で承認を得て行った(承認番号:KE21-63)。

生体データの取得は、7人の被験者(いずれ も健康な20代男性)の10部位(各左右の腓腹 部・太腿部前面・太腿部後面・腹部・腰部)に フレキシブルプローブを貼り付けて行い、合計 70データ取得した。データ取得の際は、フレ キシブルプローブによるRFデータの計測と同 時に、正解の素子アレイ形状を光学式3Dス キャナを用いて計測した。計測された正解素子 アレイ形状は、DNNの学習や評価に使用した。 図4に本実験のために作製したフレキシブルプ ローブを用いたデータ取得の様子を示す。

本実験で取得した生体データはシミュレー ションデータと比べて数が限られており, DNNを学習するためには不十分な可能性が あった。そこで本実験では DNN の学習を以下 の3通りの方法で行い,生体データ数が限られ ている場合に最適な学習方法を調べた。

- ・DNN (sim):シミュレーションデータのみ を用いて学習
- DNN (in vivo): 生体データのみを用いて学
 習
- DNN (sim+in vivo):学習済みの DNN (sim)の出力層を生体データを用いてファ



図4 人を対象とする実験におけるデータ取得の様子

インチューニング

DNN (in vivo) と DNN (sim+in vivo) は, 7 人の被験者のデータの内, 6 人のデータを用 いて学習を行い,残りの1 人のデータを用いて 評価を行った。DNN (sim)の評価には7 人全 員のデータを用いた。

推定性能の評価は、シミュレーション実験と 同様に素子座標のMAEと再構成画像の MSSIMを用いて行った。またDNN (sim), DNN (in vivo), DNN (sim+in vivo)の推定 形状は、直線形状や先行研究による推定形状と 比較した。

図5に精度評価結果の3例を示す。左から正 解,直線,先行研究,DNN (sim),DNN (in vivo),DNN (sim+in vivo)の素子アレイ形 状を用いて再構成された超音波画像であり,赤 線は画像再構成に用いた素子アレイ形状を示し ている。また,上段,中段,下段のデータはそ れぞれ大腿部後面,大腿部前面,腹部のデータ である。これらを比較すると,直線形状,先 行研究,DNN (sim)の素子アレイ形状は正 解形状と大きく異なり,再構成画像にも歪みが 生じている。一方でDNN (in vivo)とDNN (sim+in vivo)では,正解に近い素子アレイ形 状と再構成画像が得られている。

テストデータに対する素子座標 MAE は, 直線形状,先行研究,DNN (sim),DNN (in vivo),DNN (sim+in vivo) でそれぞれ 4.92 mm,4.54 mm,3.84 mm,1.32 mm,1.11 mm と なり,再構成画像 MSSIM はそれぞれ 0.65, 0.66,0.67,0.73,0.75 となった。いずれの評価指 標でもDNN (sim+in vivo)の性能が最も高



図5 人を対象とする実験の結果例

く, 生体データの数が限られている場合には, シミュレーションデータと生体データを組み合 わせた DNN の学習方法が有効であることが示 された。DNN (sim) は大量のデータを用いて 学習していたが生体データに対する推定精度が 低かった。その要因としては,超音波プローブ の特性がシミュレーションと実機の間で異なっ ていたことや,超音波の多重散乱などのシミュ レーションでは想定されていなかった現象が生 体計測では生じていたことなどが考えられる。

結論

本研究では,超音波を用いた生体モニタリン グを実現するために、DNN を用いてフレキシ ブルプローブの素子アレイ形状を推定する方法 を開発した。DNN は自然画像を元に作成した シミュレーションデータや、実機フレキシブル プローブを被験者の体に貼り付けて取得した生 体データを用いて学習した。評価実験の結果. 提案手法によってリアルタイムに素子アレイ形 状が推定された。また、シミュレーションデー タを用いた学習と生体データを用いたファイン チューニングを適切に組み合わせることによっ て、実際の生体計測データに対しても高精度な 形状推定を行われた。これらの結果から、提案 手法を用いることによって日常生活における生 体内部のモニタリングが実現される可能性が示 された。

[成果の発表, 論文など]

- [1] Takumi Noda, Takashi Azuma, Yutaka Ohtake, Ichiro Sakuma, and Naoki Tomii, "Ultrasound Imaging with a Flexible Probe Based on Element Array Geometry Estimation Using Deep Neural Network," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 69, no. 12, pp. 3232–3242, 2022.
- [2] Takumi Noda, Ichiro Sakuma, Takashi Azuma, and Naoki Tomii, "Element Array Shape Estimation by Minimizing the Reconstructed Image Entropy: In Vivo Study," 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium, Venice, Italy, 2022.

[3] Takumi Noda, Ichiro Sakuma, Takashi Azuma, and Naoki Tomii, "Element Array Shape Estimation by Minimizing the Reconstructed Image Entropy: In Vivo Study," 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium, Venice, Italy, 2022.

[4] 野田拓実,東隆,佐久間一郎,富井直輝,ウェ アラブル超音波プローブによる超音波撮像を実現す るための深層学習を用いた素子配置推定手法の開発, 第10回看護理工学会学術集会,東京,2022.