

博士論文（要約）

三次元乳房超音波撮像における撮像手法間でのアーチファクトの
性質の違いに関する検討

出口 智基

背景と目的

本研究では、二つの乳房用 3 次元超音波撮像手法のアーチファクトの比較検討を行った。乳がん検診においてガイドラインで推奨される撮像方法はマンモグラフィーであるが、乳腺密度の高い被検者（デンスブレスト）での癌発見率の低下が知られており、J-START の研究では超音波の併用により癌発見の感度向上に有効であることが示されている。しかしながら、超音波検査では測定対象を変形させながら、三次元の対象の特定に断層面をいくつか記録に残すという撮像方法であるために、撮像を行う技師のスキル依存性（超音波プローブ操作のスキルや読影スキル）が課題となり、検診手段として普及させることが難しい。

この超音波撮像の課題解決の手法として、人の手の動きに左右されない乳房超音波三次元画像を取得できる USCT および ABUS が注目されている。USCT や ABUS は超音波を用いて 3D スキャンするため、再現性の高いデータを取得することが出来る。それぞれ程度の差はあるものの、医師や技師のスキル依存性も低下している。USCT や ABUS によって、乳がん検診が抱える「精度管理」と「人的リソース不足」の問題解決が期待される。ABUS は既に薬事認証され、臨床現場で使用されるようになって久しい。被験者は仰臥位をとり、乳房全体をモーターで駆動する口径の大きな Linear Probe により矢状断方向に自動でスキャンし、検査施行者依存性の少ない超音波 3 次元画像データの取得と、画像処理により矢状断から冠状断面への撮影データの変換が可能である。体格や乳房サイズによるが、片胸あたり 2 回か 3 回のボリュームスキャンを行う。一方、USCT は物体を 360 度、超音波送受信機で取り囲むことで、超音波撮像特有の干渉縞であるスペックルを低減することで生体構造の視認性を向上し、透過波成分も使用した撮像モードを使用することで、従来にない物理量も可視化することが可能となる。この技術は約 40 年前のメイヨークリニックから発表されたが、当時はデータ量が膨大で解析に時間がかかることから実用化が難しいとされていた。画像処理プロセッサ（GPU）が安価になり、高速演算処理も出来るようになってきたことにより実用化の検討が進んでいる。

断層像撮像においては、各画素値がその場に存在する生体構造や構成物質の特性を反映した情報であることが理想である。しかし現実の撮像手法においては、周囲に比べて著しく特性の異なる領域の存在がアーチファクトを介して他画素にも影響を与えることで、画

像の信頼性を低下する。従来の超音波撮像は基本的には A モードと呼ばれるライン上に音の送受信を行い、このラインを横に操作することで 2 次元画像を取得する。ABUS では、更に断層位置をもう一次元方向に動かすことで 3 次元撮像を行っているため、深部情報は必ず手前の伝搬経路の音響特性の影響を受ける。一方 USCT では、断層面内においては多方向から情報を取得することが可能であり、各画素の情報の独立性が向上していると考えられる。以上を鑑みて、本研究では以下の検討を行う。

リニアアレイを用いた ABUS 的な撮像と、リングアレイを用いた USCT 撮像のそれぞれのアーチファクトに関して、撮像過程の定式化による理論的な検証を行い、次に Ray Trace 法の数値シミュレーションによる検証を行う。その後、当研究室で開発された USCT、および医療機器として販売されている ABUS を模した超音波機器を実験室内で構成した超音波装置を用いて、乳房ファントムを対象に撮像を行い、取得した画像の比較検証を行った。

1. 画素の独立性と再構成アルゴリズムの堅牢性の検討

生体内の点散乱体における散乱波の情報取得に関して、リングアレイとリニアアレイを用いた場合の比較を以下に行う。エコー信号の取得過程を線形システムとして数理モデルで表現を行い、この数理モデルの逆問題として画像再構成処理を定式化することを試み、リングアレイとリニアアレイを用いた撮像の比較を行う。撮像の数理モデルは、取得したエコーデータを示すベクトル \mathbf{d} と、画素上の散乱体強度分布を示すベクトル (2 次元の散乱体分布を 1 次元に並べ直したもの) \mathbf{I} と、エコー信号取得過程を示す行列 \mathbf{G} を使って、 $\mathbf{d}=\mathbf{G} \mathbf{I}$ と示すことができる。 \mathbf{G} の逆行列を使うことで再構成アルゴリズムを定式化できる。この行列のランクを調べることで、画素の独立性や再構成アルゴリズムの堅牢性を確認する。散乱体の二次元分布に対して、1 辺上に送受信素子を配列したリニア撮像と、取り囲む 4 辺上に送受信素子を配列したリング撮像の比較を行った。縮退を考慮しない場合、画素数を N の二乗とするとリングアレイを用いた撮像での経路数は $16N^4$ 通りであり、同じく経路数が N^4 のリニアアレイを用いた撮像の場合と比べて 16 倍の冗長性があることが確認できる。ただしエコー撮像の場合、伝搬時間が同一になる経路に関しては区別することができない。このような縮退の効果に関しても以下のように検討を行った。まず、モンテカルロ法を導入して、乱数によって選択する経路を定める (送受信素子番号と散乱体の座標を選択、伝搬経路長を計算する)。次に撮像行列の対応する要素に現象のカウント数を追加する。十分な量のモンテカルロ試行後に撮像行列を定める。ここで撮像行列 \mathbf{G} のサイズは、行の長さが画素数の自乗 (未知数の数)、列の長さが送受信条件ごとの伝搬経路長の累積数である。撮像行列は正方行列ではないので、階数を計算することができない。そこで、「列の長さ」が「行の長さ」より大きくなる条件において、特異値解析を行い、撮像行列を用いた連立方程式に解があるかを調べた。結果に関して、リニアアレイを模した 1 辺の場合とリングアレイを模した 4 辺の場合で比較を行い、以下の結

果を確認した。

- ・単位長さ当たりの素子数が同じ条件では、4 辺に素子が有る場合の最小特異値が、1 辺に素子が有る場合のそれより大きい。

- ・総素子数が同じ条件では、1 辺の場合の最小特異値が、4 辺の場合のそれよりやや大きい。

撮像システムの設計開発において、グレーティングビームの生成を抑えるために素子間隔の最適条件が定まっていることを考慮すると、単位長さ当たりの素子数、つまり素子間隔が同じ条件で比較するのが妥当である。今回の検討では、最小特異値に関して 3 倍から 1.4 倍程度、4 辺の場合が大きくなることが確認できた。(縮退を考慮しない場合の結果であった 16 倍よりはかなり小さい結果となった。)

2. Ray trace 法による影の影響評価

撮像視野内に置いた吸収体（以下、黒体）が受信開口の上に形成する影の大きさについて、リングアレイとリニアアレイを用いた撮像手法それぞれに関して音響 Ray trace 法により比較検討を行った。Ray trace 法は MATLAB により実装した。黒体の大きさは直径の 20%、完全吸収体とした。結果として、リングアレイの場合は -6dB 以上の変化があった領域は黒体の直径の数%の領域に留まったのに対して、リニアアレイを用いた場合は後方陰影として -6dB の変化があった領域は直径の 125%程度の範囲に広がっており、リニアアレイではリングアレイの場合に比べて影の範囲は非常に小さくなることが確かめられた。これは理論で検証した「多方向からの情報を取得できるリングエコーではアーチファクトによる輝度低下が少ない」、という仮説を検証したシミュレーション結果であると考えられる。

3. 実験的な検討

当研究室で開発された USCT、および ABUS を模した超音波機器（日立製作所製 F75 とリニア探触子 UST-5415 の組み合わせを三軸ステージでプローブをメカニカルスキャンしたもの）を実験室内で構成した超音波装置を用いて、乳房ファントムを対象に超音波画像で生じる後方陰影に関し、実機器を用いた仮説の検証を行った。

USCT は周波数 2 MHz、ABUS を模した装置では周波数 10 MHz であり、ファントムは OST 社製の高分子ハイドロゲルをシリコンゴムで表面コーティングしたものをを用いた。アーチファクト評価のために 3cm×3cm のポリステル格子を組み込んだ。

実機検証の結果、リニアエコーで取得した画像ではアーチファクトを認めた。一方、リングエコーではアーチファクトを認めず、実像の乳房ファントムを描出していると考えられ、これはシミュレーションによる検証と一貫した結果であると考えられる。

4. まとめ

撮像過程の定式化による比較検討の結果、撮像条件数の多い4方向からの撮像では、1方向からの撮像に比べ、ノイズに対する安定性の観点で優れていることが示された。Ray Trace 法を用いた検討では、リニアエコーでは黒体の周囲広範囲に陰影が生じたのに対して、リングエコーでは陰影は黒体の極近傍に限定することを確認した。実際の超音波機器を用いた比較で ABUS を模擬した撮像ではテグスに関してアーチファクトを検出し、USCT では同じアーチファクトを検出しないことを実験的に確認した。以上の結果から、理論比較、数値計算、実験いずれにおいてもリングエコーはリニアエコーに比べて後方陰影の影響が小さくなることを確認した。