

マイクロ波イメージングによる初期乳がん検診法の確立

Early Breast Cancer Detection via Microwave Imaging

1071008

研究者代表 静岡大学・教授 桑原 義彦

1. 研究の目的

日本では成人女性の30人に1人の割合で乳癌が発生し、女性の癌の中では最も罹患率が高い。現在、癌検診法としてX線マンモグラフィーが用いられている。しかし、

- 石灰化を伴わない癌を見つけることは困難
- 検査・診断に時間がかかり、検診コストが高い
- 乳房圧迫による患者の苦痛が大きい
- 若年層についてはX線被曝の影響が無視できない

などの問題点が指摘されている。本研究はX線マンモグラフィーと比較し、安全・確実・低コストのUWB(Ultra Wide Band)レーダを用いた初期乳がん検出装置を実現することを目的とする。

電磁波による癌検診システムの基本原理は、癌と周辺組織の電磁気学的性質の顕著な差である。この差はX線トモグラフィーに比較すると10倍以上大きく、より鮮明な画像を得ることが期待できる。

複数のアンテナから乳房にUWBパルスを照射し、時空間ビームフォーミングによって散乱波エネルギーの分布画像を構築する方法が提案され、計算機シミュレーションにより数mm程度の初期癌が発見できることが報告されている。

しかし、最初の研究発表から8年を経ているがいまだに生体画像は得られていない。

本研究の目的は、これまで発表されている手法を実験的に検証してその問題点を明らかにし、その解決手法を提供することにある。

このため、次の事項について検討を行った。

- 3次元伝播解析および撮像アルゴリズムのシミュレーションプログラムの開発
- モノスタティックおよびマルチスタティックレーダによる撮像システムの開発
- ファントムによる評価

2. 撮像アルゴリズム

図1にUWBレーダを用いた撮像原理を示す。アレーアンテナを撮像部位に対向させ、各アンテナから順次パルスを送信し、散乱応答を受信する。送信パルス幅が狭いほど高い分解能が得られる。受信方法として、送信と同一のアンテナで受信するモノスタティックレーダと送信と別のアンテナで受信するマルチスタティックレーダがある。本研究では両者について検討しているが、ここではモノスタティックレーダについて簡単に説明する。

撮像部位をピクセルに分割し、各ピクセルからの散乱応答電力を求め可視化する。ピクセルごとにアンテナからの距離に基づく応答の伝搬遅延を求め、この分だけ応答を時間シフトする。そのピクセルに散乱源があるなら、各アンテナの受信応答のタイミングが一致し総和を取ると

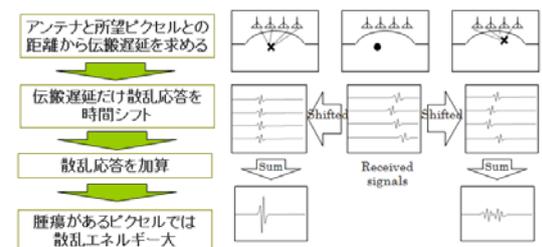


図1 撮像原理

大きな応答が得られる。そのピクセルに散乱源がないなら総和を取っても大きな応答は得られない。ピクセルごとに応答の総和を計算していけば散乱応答分布が得られる。癌組織は脂肪組織や乳腺より誘電率や導電率が高いので散乱が強く表れるので癌の検出が可能である。

2.1 MIST ビームフォーミング

上記の撮像方式は Delay and Sum と呼ばれ超音波診断装置に使用されている。しかし、生体の誘電率や透磁率は周波数依存性があるので、UWB のような広帯域信号を用いる場合、伝搬媒質の周波数特性を考慮する必要がある。

MIST ビームフォーミングでは、各アンテナの受信応答を、ピクセルに応じて時間シフトさせた後周波数領域に変換し、指定したピクセルのアレー出力が 1 になる重みを周波数-空間領域に分解された信号に乗じて総和を取り、再び時間応答に戻して散乱電力を求める。重みは、媒質の周波数依存性を考慮した伝搬損に基づくレーダ応答と送信パルスのスペクトルから、最小 2 乗法をつかって計算する。

2.2 MAMI

MIST ビームフォーミングはモノスタティックレーダを想定したアルゴリズムである。それに対し MAMI はマルチスタティックレーダを想定している。

アンテナ素子とピクセルの距離に基づき時間シフトと減衰補正を行ったアレーアンテナの受信応答のステアリングベクトルを、アレー受信信号の共分散行列から拘束付き最小 2 乗法で推定したのち、Capon 法を使って、そのピクセルからの応答を 1、それ以外のピクセルからの応答を最小にする重みを求める。MIST ビームフォーミングは対象とするピクセル以外からの応答について考慮しておらず、より鮮明な撮像が期待できるが、ステアリングベクトルの推定に経験的なパラメータを使うので、習熟した撮像テクニックが要求される。また演算量が膨大で画像を構築するために膨大な時間 (PC レベルで 3 日) を要する。

2.3 MS-MIST

MS-MIST は MIST ビームフォーミングをマルチスタティックレーダに拡張したアルゴリズムである。MAMI と同等以上の鮮明な撮像ができ、処理時間も MAMI の 1/10 となる。

2.4 アーチファクト除去

マルチスタティックレーダでは隣接アンテナからの送信パルスが直接受信される。また、皮膚は誘電率や透磁率が脂肪組織より高く、皮膚の外からパルスを入射させると大きな反射が起こり、腫瘍からの散乱が埋もれてしまう。

図 2 に示すように、アンテナ各素子と皮膚間の位置関係が同一とみなせるならば、各アンテナの応答を平均し、これを差し引くことにより皮膚からの反射を取り除き、腫瘍からの応答を得ることができる。図 3 の青い応答は、皮膚から 1cm 離れた等間隔 8 素子アレーアンテナの隣接素子で受信した応答、赤い応答は図 2 の処理によって抽出した腫瘍の散乱応答である。これらの応答は FDTD 法によって求めている。

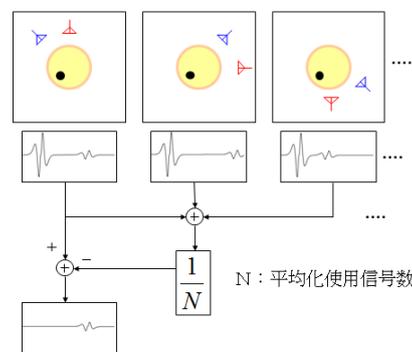


図 2 平均化によるアーチファクト除去

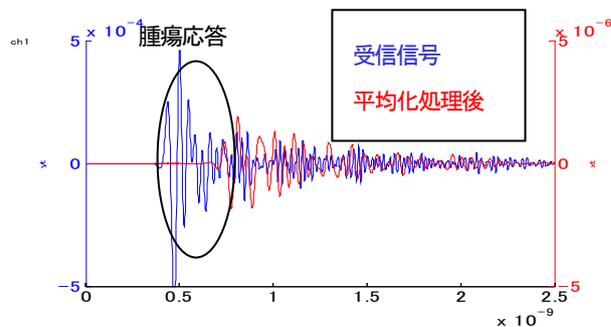


図 3 腫瘍散乱応答の抽出例

3. シミュレーション

計算機シミュレーションにより各撮像アルゴリズムを評価した。図4にシミュレーションモデルを示す。撮像対象は胸壁、脂肪組織、乳腺、乳首、皮膚と腫瘍から構成される。それぞれの構成の誘電率、導電率も図4に合わせて示している。アンテナは12×6素子を半径4cmの半球面上に置く。皮膚からの距離は0.8cmである。また、アンテナは脂肪組織と同一の誘電率を持つ整合媒体中にあると仮定する。腫瘍の半径は

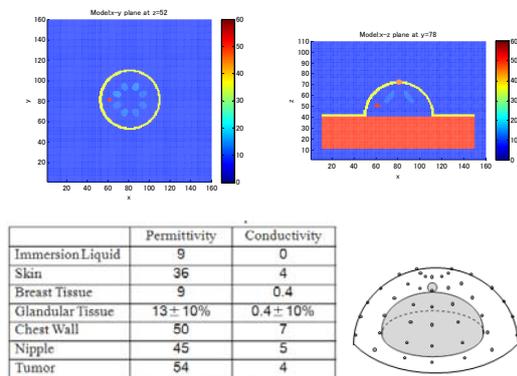


図4 シミュレーションモデル

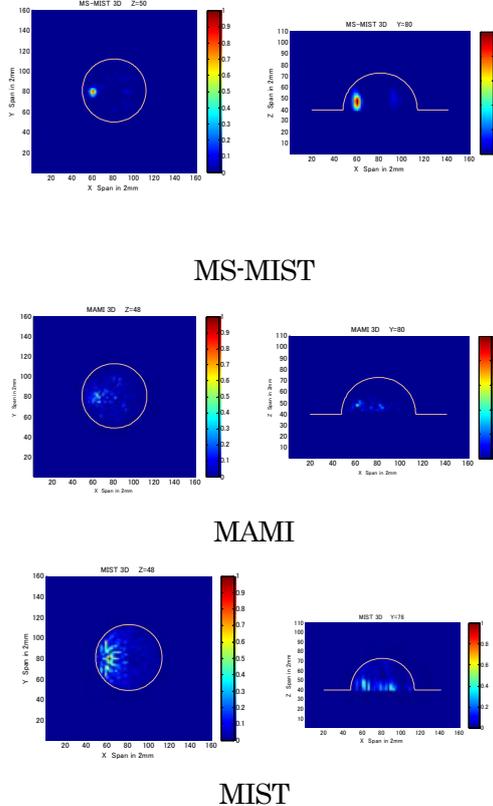


図5 撮像結果

3mm, 皮膚の厚さは2mmである。ピクセルの大きさは1辺が1mmの立方体である。図5に撮像結果を示す。MS-MISTが最もはっきりと腫瘍をとらえている。1ピクセルあたりの計算時間はPentium4の2.2GHzのPCを使用した場合、MS-MISTが21秒、MAMIが186秒、MISTが0.05秒である。

4. ファントムの誘電率評価

本技術では対象の誘電率及び導電率の把握が重要である。図6の誘電率計測システムにより腫瘍（水及び水とジアセチンの混合溶液）と脂肪組織（マーガリン）ファントムの誘電率と導電率を計測した。図7はマーガリンの導電率と誘電率で、脂肪組織に近い値を示す。水の誘電率と導電率は公表値にほぼ一致する値が得られた。



図6 誘電率測定の様子

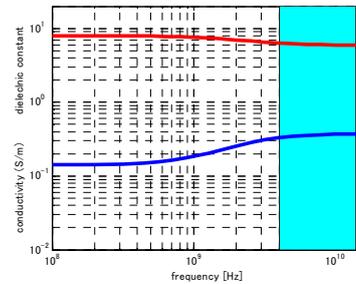


図7 脂肪組織(マーガリン)の誘電率(赤)と導電率(青)

5. マルチスタティックレーダを用いた撮像

図8にマルチスタティックレーダの構成と外観を示す。ヴィバルディモノポールを半径60mm円周状に等間隔で8個並べ、そのうちひとつを送信用とする。受信アンテナはアンテナ切り替え機によって選択され、ネットワークアナライザで S_{12} を測定した。掃引周波数は4-14GHzである。また、複数方向からの送信を模擬するため、撮像対象を

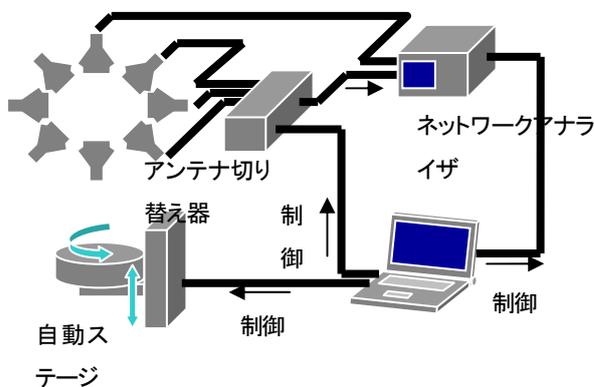


図8 マルチスタティックレーダシステム



図9 ファントム

ステージに置いて上下・回転させる。各機器は1台のPCにて制御される。このように機械・電子併用によって円周方向に8素子、垂直方向に6素子(素子間隔5mm)の円筒アレーを模擬する。受信した信号はPCに取り込まれ、MS-MISTによって診断画像が再構成される。図9は撮像に使ったファントムである。半径5cm、厚さ1cmの発泡スチロールの容器にマーガリンを詰め脂肪組織を、直径6mm、長さ10mm、厚さ1mmのビニール管に水を封印し癌組織を模擬した。図10は撮像結果である。がんの部分からの散乱が鮮明にとらえられていることがわかる。

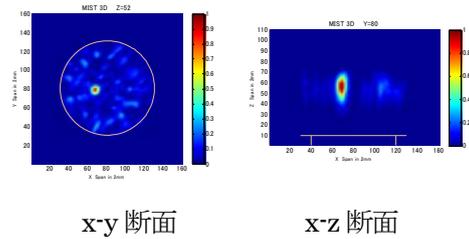


図10 撮像結果

6. 今後の研究計画と課題

臨床に応用するため、今後次の事項について検討する計画である。

- (1) 撮像部位の非対象性によるアーチファクト除去能力低下の回避策の検討
- (2) 人体に近いファントムを用いた実験
 - ファントムの作成
 - 整合媒体の選定
 - 整合媒体中で動作するアンテナの開発
 - 機械走査を電子走査に置換
 - 人体とのインターフェース法の確立
- (3) 臨床での撮像システムの試作
- (4) 臨床での撮像・評価
- (5) 読影法の確立

成果の発表

1. 堀江, 桑原, “UWB レーダによる初期乳癌検診—3次元 FDTD モデルによる解析—,”2008 信学総大, B-1-18
2. 大石, 桑原, “UWB リッジホーンアンテナの油中における特性評価,”2008 信学総大, B-1-148.
3. 堀江, 桑原, “マイクロ波イメージングによる初期乳癌検診—層ファントムによる実験—,”第48回ME学会大会(in press).
4. 鈴木, 桑原, “マルチスタティック UWB レーダを使用した初期乳癌検診,”第48回ME学会大会(in press)
5. K. Suzuki and Y. Kuwahara, “Microwave Mammography using Multi Static UWB Rader,” 2009 IEEE Antennas and Propagation Intn. Symp. (in press)