

## UWB パルスレーダによる物体像再構成アルゴリズム

佐藤 亨<sup>†a)</sup> 阪本 卓也<sup>†b)</sup>

Image Reconstruction Algorithms for UWB Pulse Radar Systems

Toru SATO<sup>†a)</sup> and Takuya SAKAMOTO<sup>†b)</sup>

あらまし これまで超広帯域 (UWB) パルスレーダによる物体形状推定技術は、主に埋設物探査や遺跡探査などの地下探査や非破壊検査の用途で多く用いられてきたが、近年その動向に変化が見られる。ここ数年、米国の先導により日本でも UWB 信号の標準化の検討が行われ、空气中で使用するレーダでも UWB 信号が利用可能となったため、近い将来には地上で活動するロボットの周囲環境測定や自動走行自動車の実現に大きく貢献することも予想される。しかしながら、レーダによる物体形状推定は設定不適切逆問題の一種であり、本質的に困難な問題として知られている。そのため、パルスレーダのための形状推定アルゴリズムはその精度や安定性を高めるべく多くの研究がなされてきた。筆者らが開発してきたレーダ画像化手法である SEABED 法は、ロボットなどのリアルタイム用途への適用を視野に入れたレーダ立体形状推定手法である。この手法は可逆な変換を利用することにより、従来手法では不可能であった高速な立体形状推定を可能とする特徴を有する。本論文ではパルスレーダを用いた物体形状推定アルゴリズムの最近の動向を述べ、筆者らが近年開発したレーダ画像化手法である SEABED 法の詳細を説明する。

キーワード 超広帯域パルスレーダ、レーダ画像化、逆問題、形状推定、SEABED 法

### 1. ま え が き

災害現場での救助用ロボットや自動走行自動車などの実現のためには周囲の物理的環境を高精度に測定する必要がある。これまでは、こうした近距離の高精度測定の目的にレーダを使用するには距離分解能が十分に高く、実現が困難であった。現在までに、地雷探査や遺跡探査などの地中を非破壊的に画像化する手法にインパルス波や数サイクル程度の広帯域パルスを用いた地下探査レーダが頻りに用いられている。従来、地下探査レーダで用いる広帯域パルスは法律上の問題で空气中で用いることが不可能であったが、2002年に米国連邦通信委員会が超広帯域 (Ultra Wide Band; 以下 UWB と略す) 信号の標準を定めたことにより新たな道が開かれることとなった。比帯域 20% 以上または帯域 500 MHz 以上と定義される UWB 信号を用いることで地下探査レーダのような高距離分解能測定が空

気中へ応用可能となるため、多くの注目を集めている。こうした新たな応用のみならず、地雷探査やセキュリティチェックのための非破壊検査などの従来からある電磁波画像化技術の研究も盛んに行われている [1]。一方、レーダ画像化は設定不適切逆問題の一種として知られており、本質的に困難であることが知られている。この分野では現在までに多くの興味深い研究がなされており、本論文ではそれらについて概観する。更に、近年筆者らが研究を進めている新たなレーダ画像化手法である SEABED 法について述べる。SEABED 法は可逆な変換を用いることで、特定の条件のもとで高精度に目標形状を推定することが可能である。この手法は従来のレーダ画像化手法では不可能であった高速処理を可能とするため、今後のリアルタイム用途でのレーダ画像化手法に重要な手掛りを与えることを期待し、紙数を割いて詳細に述べる。

### 2. 従来のレーダと UWB レーダ

最初に、従来のパルスレーダと比較することで UWB パルスレーダの特徴を分解能の観点から説明する。レーダにより目標形状を知るためには目標の構造の寸法よりも高い分解能が必要である。従来のパルスレーダで

<sup>†</sup> 京都大学大学院情報学研究所通信情報システム専攻, 京都市  
Department of Communications and Computer Engineering,  
Graduate School of Informatics, Kyoto University, Sakyo-ku,  
Kyoto-shi, 606-8501 Japan

a) E-mail: tsato@kuee.kyoto-u.ac.jp

b) E-mail: t-sakamo@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp

は指向性アンテナを方位角方向に回転させながら信号の送受信を繰り返す．図1に従来のレーダによる測定方法の概略図を示す．パルスレーダの距離分解能  $\Delta r$  はパルス幅  $\Delta t$  を用いて次式により表される．

$$\Delta r = c\Delta t/2 \quad (1)$$

ただし， $c$  は信号の伝搬速度であり，真空中では光速に等しい．また，ビーム幅  $\theta_b$  はアンテナ幅  $D$  及び信号の波長  $\lambda$  によって次式により近似的に表される．

$$\theta_b \simeq \lambda/D[\text{rad}] \quad (2)$$

方位分解能は目標距離及びビーム幅によって  $r\theta_b$  と表される．例として，Cバンド(5GHz)，3dB帯域幅1MHz(パルス幅  $1\mu\text{s}$ )，アンテナ直径3mのレーダシステムを仮定する．この場合，距離分解能は150mとなり，方位分解能は目標距離10km程度の近距離でも200mとなり，大型タンカー程度の分解能しか得られない．このように，単純なビーム形成のみではレーダによる目標形状推定は困難であることが分かる．

このように従来のレーダシステムでは目標の位置，速度，及びレーダ散乱断面積(RCS)のみが測定可能であり，物体形状の推定は困難であった．ただし，ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)技術はその例外である．後述する合成開口処理ではアンテナを走査するのに対し，ISARでは逆に目標の回転運動を利用して目標形状の推定を行う．ISARによって，上述の分解能を超える高分解能画像を得ることが可能であり，船舶や航空機の形状が推定できる[2]．

UWBパルスレーダは，以上に述べた従来のレーダシステムと異なる特徴を有する．パルスレーダでは一般に送信中には受信を行えないため，最小観測距離は式(1)で定まる  $\Delta r$  より小さくすることはできない．しかし超短パルスを用いるUWBレーダでは  $\Delta r$  は数cm程度であり，至近距離の測定が可能である．逆に送信電力は制限され，広帯域であるため雑音電力も大きく，SN比の制約から遠距離の測定は困難である．このため，UWBパルスレーダは広い指向性をもつアンテナを使用し，近距離目標を測定する．図2にUWBパルスレーダによる測定の例を示す．同図のように無指向性アンテナを走査しながら信号の送受信を繰り返す，受信信号を用いて目標位置のみでなく，目標形状を推定する．アンテナの走査範囲は前述のアンテナ幅  $D$  とほぼ等価であるため，方位分解能は目標距離とアンテナ走査範囲で決まる．近距離の測定は方位分解能

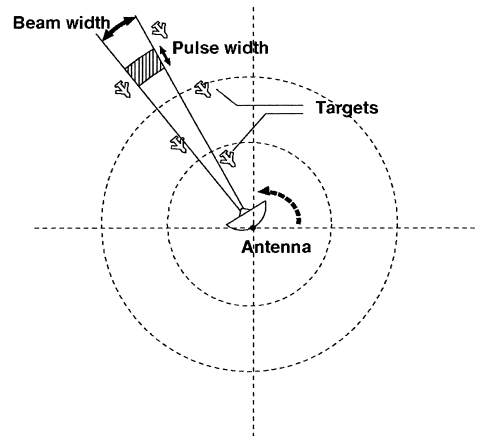


図1 従来のパルスレーダによる測定  
Fig.1 Observational scheme of a conventional pulse radar.

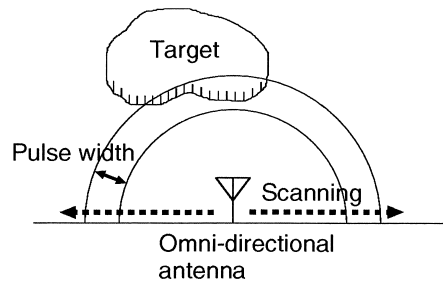


図2 UWBパルスレーダによる測定  
Fig.2 Observational scheme of a UWB pulse radar.

の点でも有利である．例えば，中心周波数5GHz，比帯域100%のパルスを用いるUWBパルスレーダでは，式(1)は3cmとなり，最小観測距離が短く，高い分解能が得られることが分かる．

このように距離分解能及び方位分解能の双方を高めることで，近距離の目標に対してレーダによる形状推定を実現できることがUWBパルスレーダシステムの特徴である．

### 3. レーダによる物体像再構成アルゴリズムと目標モデル

以上では，従来のレーダシステムと同様に距離分解能と方位分解能によって分解能を考察してきたが，実際には近距離の目標形状推定では距離と方位を分離して扱うことは困難であり，近傍界での電磁気現象を考慮する必要のある複雑な問題となる．このように，UWBパルスレーダによる近傍目標物体の形状推定は従来のレーダ信号処理とは異なる点が多い．既知の形

状の物体からの散乱電磁界を求める問題は順問題と呼ばれ、多くの手法が知られる。これに対して散乱電磁界から物体形状を推定する問題は逆問題と呼ばれ、一般に順問題より困難である。特にレーダによる形状推定は設定不適切逆問題の一種として知られ、物体像再構成アルゴリズムの開発のために多くの研究がなされてきた。

UWB パルスレーダによる物体像再構成アルゴリズムを大まかな特徴により分類する。これらはパラメトリックな手法とノンパラメトリックな手法に大別される。

• パラメトリックな手法

比較的少数のパラメータで目標形状を表現し、受信信号をこれらのパラメータで表現する。目標のモデル化によりパラメータを定める。

• ノンパラメトリックな手法

パラメータなどで情報を縮約することなく、データを直接に目標画像へ変換する。モデルを使用しない。

両手法の主な特徴は次のとおりである。パラメトリックな手法では目標形状を表現するパラメータを変数とする評価関数を作成する。こうすることでレーダ画像化を単純な最適化問題に帰着させることが可能である。最適化のみで目標形状が得られるため、処理を簡潔に記述できる長所がある。更に、モデル化により推定対象の自由度を減少させ、安定化が期待できるという長所を有する。一方、モデルに適合しない目標形状に対しては適用が不可能であるという問題がある。

逆にノンパラメトリックな手法はモデルに基づかないために、一般の目標物体を表現できるという長所を有する。一方で推定像が不確定になるために像の劣化が生じ、虚像などが生じることが問題となる。本論文で扱う手法のうちで領域積分方程式、FBTS法、及び離散モデルフィッティング法はパラメトリックな手法に分類される。一方、合成開口処理、マイグレーション法、回折トモグラフィ、及びSEABED法はノンパラメトリックな手法に分類される。表1にパラメトリック及びノンパラメトリックな手法の比較を示す。

上述のとおり、パラメトリックな手法を用いる場合には目標形状のモデル化が行われる。モデル化の手法は次のように分類することができる。頻繁に用いられるモデルにはグリッドモデル (grid model) 及び境界モデル (boundary points model) がある。図3に目標物体のモデル化の例を示す。左は目標物体像をラスタ形式でモデル化するグリッドモデルであり、各々

表1 パラメトリックな手法とノンパラメトリックな手法の比較

Table 1 Characteristics of parametric and a nonparametric algorithms.

手法	パラメトリック	ノンパラメトリック
特徴	モデル使用	モデル不使用
精度	雑音下で高精度	雑音下で低精度
適用制約	モデルで表現可能な対象	一般の対象・制約なし
計算時間	モデルの自由度を増すと長い	従来法は一般に長い
課題	対象に応じた適切なモデル選択	対雑音性能向上 計算時間短縮

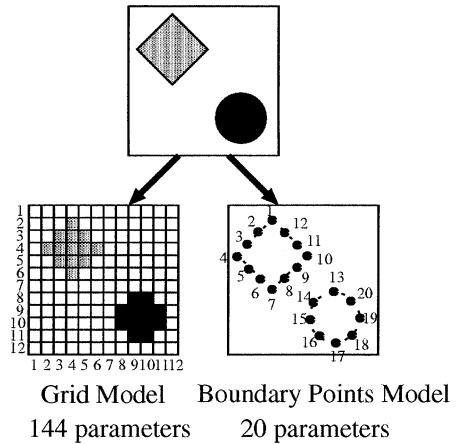


図3 目標モデルとパラメータ数  
Fig. 3 Target models and the number of parameters.

のグリッドが誘電率、透磁率及び導電率といったパラメータを有する。異方性を表現する場合には各々のグリッドにテンソルを割り振ることで実現される。例えば領域積分方程式による画像化ではグリッドモデルを用いる。グリッドモデルによるモデル化のみでは情報の縮約はできず、パラメトリックな手法の長所である安定化が期待できない。特に、立体像を扱う際にはパラメータ数が非常に多くなり、逆問題特有の不安定性の問題が生じる。しかし、この場合でも正則化項を付与することで等価的に少数のパラメータでの表現を行い、安定した処理を実現できる。

グリッドモデルのパラメータ数の問題を解決する方法の一つとして目標形状をベクトル形式でモデル化する境界モデルが使用される。図3右に境界モデルの例を示す。この境界モデルを用いることで、最適化パラメータ数を大幅に減少させることが可能である。目標物体が明りょうな境界を有するという先見情報がある場合には、このモデルが特に有効である。境界モデル

を用いることで、グリッドモデルのような正則化項の導入を必要とせずに処理の安定化が実現される。

境界モデルを使用して反復的に形状推定を行う場合には境界同士が交差しないような工夫が必要である。この問題を解決するために Ferraye ら [3] は等高線変形モデル (countour deformation model) と呼ばれるモデルに基づく高精度形状推定法を扱った。このモデルでは二次元問題を想定する場合には 2 変数関数  $\phi(x, y)$  に対し、 $\phi(x, y) = 0$  を満たす  $(x, y)$  の描く閉曲線を目標物体の境界とする。この際、2 変数関数を滑らかに保つために拘束条件を与えることにより推定目標形状の滑らかさが保証される。境界モデルと異なり、等高線変形モデルを使用することで目標モデルの境界同士が交差することは本質的に生じない。更に、孤立した虚像が反復により消滅する場合にも  $\phi(x, y)$  が負または正の領域に移動することで自然に表現される。

#### 4. 合成開口処理・マイグレーション法

合成開口処理は前節での分類のノンパラメトリックな手法に属するものである。合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar; 以下 SAR と略す) は航空機や人工衛星に搭載され、地理画像を得るためにしばしば用いられる [4]。近年、リモートセンシングの分野でポラリメトリやインタフェロメトリといった新たな手法の研究が活発に進められ、地理や植生の正確なデータが取得されている [5], [6]。合成開口処理は地下探査レーダ (Ground Penetrating Radar; 以下 GPR と略す) の画像化にもしばしば使用され [7], Kirchhoff マイグレーションとも呼ばれる [1]。

リモートセンシングでの合成開口処理は波長より大きな構造を有する目標を対象とし、比較的狭帯域のパルスを使用しているのに対し、GPR では波長程度の大きさの物体を広帯域パルスを用いて測定することが多い。高分解能レーダ画像を得るためには送信信号として短パルスが有利である一方で、地中の減衰は高周波を抑圧する働きを有するため、両者の妥協としてパルス長を使用する電波の周期と同程度に選ぶためである。合成開口処理は別のアンテナ位置で取得した信号を同相に足し合わせることで高分解能像を得る手法であるが、このためには被測定空間とアンテナ位置の間の Green 関数やその近似関数が必要となる。GPR の場合には地下の不均質媒質の影響を考慮した Green 関数が必要となり、単純な処理での実現は容易でない。逆に空気中などの均質媒質内では合成開口処理は容易

に実現されるため、UWB パルスレーダによる空気中の目標形状推定への適用は比較的単純となる。例えば Bond ら [8] はパルスレーダを用いて合成開口処理により乳がんの早期発見のための画像化について研究を行っている。彼らは生体内伝搬の周波数依存性を考慮した逆伝搬処理により皮膚から約 3 cm 内部の 2 mm の腫瘍を明りように画像化している。Narayanan ら [9] は UWB パルスレーダの実験データを用いて合成開口処理により壁面透過画像化を行った。彼らの結果は不鮮明ではあるものの、壁の反対側に配置された目標物体の像を得ることに成功している。

一般の合成開口処理で用いられる Green 関数は偏波を考慮していないスカラー波近似であるが、実際にはベクトル波として扱う必要がある。Kruk ら [10] は地下探査レーダのためのベクトル波合成開口処理を提案している。パイスタティックレーダの送受信アンテナの双方に直交 2 偏波を用いることでベクトル波の情報をすべて利用した手法を開発した。彼らは偏波を考慮した定式化により、スカラー波近似である一般の合成開口処理よりも鮮明な像が得られることを示した。

不規則媒質中の円筒導体に対し、合成開口処理により二次元形状推定した例を図 4 に示す。円筒下部の形状のみが推定されているのはアンテナが目標下方の直線に沿って走査されたためである。同図を得るための処理には Xeon 2.8 GHz プロセッサを用いて約 9 分の時間が必要である。このように画像化のための計算に長時間を要するのは、近傍目標のための合成開口処理は、航空機や人工衛星などに搭載される SAR とは異

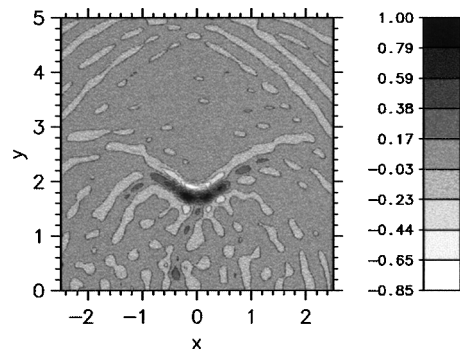


図 4 合成開口処理 (Kirchhoff マイグレーション) による不規則媒質中の円筒導体形状推定

Fig. 4 The estimated target shape by the synthetic aperture processing (Kirchhoff migration) for a metallic cylinder embedded in a random medium.

なる特徴を有するためである．SAR では、レンジ分解能の向上はパルス圧縮により行い、速度方向についてのみ、合成開口処理による分解能向上を行う．このため、合成開口処理は各々のレンジに対して独立に行われる次元の処理に縮退するため、高速な処理が可能である．一方、本章で扱った手法では平面形状推定には二次元、立体形状推定には三次元の合成開口処理が必要であるため、SAR よりも長い計算時間を必要とする．

合成開口処理の有する利点は 1) 処理が単純であり実装が容易である点、2) 目標形状や信号対雑音比にかかわらず安定な画像化が可能である点がある．一方、欠点としては 1) 目標形状によっては干渉により虚像が現れる点、2) 計算時間が長い点が挙げられる．更に、得られる像は波長程度の分解能が限界となるため、適用可能対象が使用周波数に大きく依存する特徴がある．

資源調査等の目的でしばしば使用される弾性探査ではリバースタイムマイグレーション法（以下では単にマイグレーション法と呼ぶ）[11] と呼ばれるノンパラメトリックな手法が用いられる．マイグレーション法はスカラー波である弾性波を地表の複数点で送受信したデータを用いて計算機で逆伝搬計算することで画像を得る手法である．マイグレーション法は合成開口処理と似た手法であるが、波動方程式を逆向きに解くことで逆伝搬を実現しており、合成開口処理が Green 関数を用いる点と異なる．この手法はレーダ画像化にも使用可能であるが、スカラー波でなくベクトル波として扱う必要がある．Leuschen と Plumb [12] は整合フィルタの考え方を用いて地下探査レーダのためのマイグレーション法を提案した．FDTD 法により受信信号を逆伝搬させることで逆伝搬を実現している．マイグレーション法により得られる像は合成開口処理と同じように波長程度の解像度が限度である．更に、マイグレーション法は FDTD 法などの差分方程式を用いて波動方程式を解く必要があるため、長い計算時間を必要である．

## 5. 領域積分方程式

領域積分方程式 (Domain Integral Equation) を用いる方法はパラメトリックな画像化手法の一つである．この方法は目標物体や周囲の媒質を含む領域を格子点上に配置される誘電率や導電率で表現するグリッドモデルを使用し、それらすべての未知数を決定するために領域積分方程式と呼ばれる積分方程式を数値的

に解くことで画像化を実現する．この手法はトモグラフィ技術の一種であり、目標物体を取り囲むようにアンテナを配置することが多い．アンテナを平面上や直線に沿って走査する前節の手法とは対照的である．このため、領域積分方程式は非破壊検査やポアホールレーダなどの用途に特に向いている．領域積分方程式は次式で表される．

$$E(\mathbf{r}) = E_{\text{inc}}(\mathbf{r}) + \int k_0^2 C(\mathbf{r}') E(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (3)$$

ここで  $G$  は 2 点間の Green 関数である． $C(\mathbf{r}) = \varepsilon(\mathbf{r}) - \varepsilon_b$  は目標物体のコントラストであり、 $\varepsilon_b$  は背景の比誘電率である． $E(\mathbf{r})$  and  $E_{\text{inc}}(\mathbf{r})$  はそれぞれ全電界と入射電界である．式 (3) の右辺第 2 項の積分は散乱電界である．この方程式の意味は、全電界に対し Green 関数とコントラストの積を積分核とした積分変換を施すことにより散乱電界が得られるということである．領域積分方程式自体は逆問題の一種であり、安定化せずに直接解くと極めて不安定な解が得られる．Franchois と Pichot [13] の研究では正則化項を加えることで領域積分方程式を安定に解いている．Abubakar ら [14] は三次元画像化のために領域積分方程式を解く新たな手法を提案した．式 (3) を解く上での問題は  $E(\mathbf{r})$  及び  $C(\mathbf{r})$  の双方が未知であるという点にある．そこで Abubakar らは新たに  $W(\mathbf{r}) = C(\mathbf{r})E(\mathbf{r})$  を定義し、この表現により彼らは式 (3) を二つの方程式に分割し、二つの未知変数  $E, W$  に対する連立方程式として定式化した．それぞれの等号を成り立たせる評価関数の和を新たな評価関数とし、最適化により解を求めた．

全電界  $E(\mathbf{r})$  がコントラスト  $C(\mathbf{r})$  の線形関数で表現されないことにより式 (3) は強い非線形性を有する．このため、直接に同式を解くことは困難である．この非線形問題を簡単にするため、一次の Born 近似が使用されている．一次の Born 近似は単に Born 近似とも呼ばれ、一次の Rytov 近似と等価であることが知られている [15]．Born 近似は次式のとおり線形積分方程式として定式化される．

$$E(\mathbf{r}) = E_{\text{inc}}(\mathbf{r}) + \int k_0^2 C(\mathbf{r}') E_{\text{inc}}(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (4)$$

式 (4) は式 (3) の積分内の  $E$  を  $E_{\text{inc}}$  に単に置き換えたものである．Born 近似は領域積分方程式を解くための最も単純な近似である．入射電界を目標物体が乱

さないという条件を満たす必要があり、弱い散乱体にのみ適用可能である。式 (4) は回折トモグラフィや Tikhonov 正則化法を用いた最適化により解くことが可能である。回折トモグラフィについては後の章で述べる。式 (4) の積分方程式を Tikhonov 正則化を用いて解く問題は次式の最適化問題に帰着される。

$$\text{minimize}_C V(C) \quad (5)$$

この式は関数  $V(C)$  を最小にするコントラスト  $C$  を求める最適化問題を表す。ここで  $V(C)$  は次式で表される。

$$V(C) = \left| \mathbf{E}(\mathbf{r}) - \mathbf{E}_{\text{inc}}(\mathbf{r}) - \int k_0^2 C(\mathbf{r}') \mathbf{E}_{\text{inc}}(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \right|^2 + \alpha |L\{C\}| \quad (6)$$

ここで  $L$  は微分演算子であり、 $\alpha (> 0)$  は誤差の減少と正則化制約の間の適切なバランスをとるためのパラメータである。式 (4) は線形化されてはいるものの逆問題であるため、式 (6) の  $\alpha$  が 0 ならば解が不安定になる。Budko ら [16] は Born 近似による線形積分方程式と合成開口処理の併用手法を提案した。彼らは Born 近似による線形積分方程式は目標境界を正確に推定可能である一方、誘電率の推定精度が十分でないことを指摘した。そこで彼らは誘電率推定についてのみ合成開口処理により別に推定を行った。

Born 近似による手法を適用するためには、目標物体が弱散乱体である必要があり、この条件により適用可能範囲が大幅に制限される。弱散乱体としては背景媒質と目標の誘電率のコントラストが数%程度以下であるものが挙げられる。この値は直接散乱波電力と多重散乱による不要波電力の比である SI 比と信号対雑音電力比 SN 比が同程度になる条件により決まるため、システムの雑音や目標物体の位置などにより変化する。地下探査レーダなどが画像化の対象とする目標物体の多くは強散乱体であり、Born 近似の適用は困難である。一方、Born 近似による画像化手法は、領域積分方程式の近似解を高速に得るための重要な概念を与えた。その後、近似精度改善のために Born 近似を拡張した多くの手法が研究され、現在に至っている。拡張された Born 近似による手法について以下で解説する。

Moghaddam と Chew [17] は Born 近似による手法を拡張した反復 Born 法を提案した。反復 Born 法は最初に一次の Born 近似により全電界を計算する。計算

された全電界を用いて領域積分方程式を解くことで全電界を更新する。この処理を繰り返すことにより全電界の推定精度を向上する。Chaturvedi と Plumb [18] は反復 Born 法に正則化項を導入した。彼らは各々のアンテナ位置及び格子状に量子化された目標位置に対し Green 関数を計算し、散乱波を計算するときに参照できるようにテーブルに保存し、高速化を実現した。Yu ら [19] は反復 Born 法を拡張して損失性の半空間媒質内の目標像再構成を行った。彼らは損失性半空間媒質の Green 関数を解析的に導くことでこの手法を開発した。反復 Born 近似による手法は Born 近似の要求する弱散乱体の条件を緩和することが可能である。この手法は現在でも目標形状画像化のための有効な手法の一つとして知られている。

Born 近似を拡張した手法としては、擬似線形近似も提案されている。強散乱体に対して、擬似線形近似を用いることで Born 近似よりも高精度に領域積分方程式を解くことが可能となる [20], [21]。一次の擬似線形近似は次式で表される。

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_t) = \chi(\mathbf{r}) \mathbf{E}_{\text{inc}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_t) \quad (7)$$

ここで  $\chi(\mathbf{r})$  は全電界と入射電界の比である。上記の近似を用いることで式 (3) は次式のとおり線形化される。

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_{\text{inc}}(\mathbf{r}) + \int k_0^2 C_0(\mathbf{r}') \mathbf{E}_{\text{inc}}(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (8)$$

ここで  $C_0(\mathbf{r})$  は次式で定義される新たな未知量である。

$$C_0(\mathbf{r}) = \chi(\mathbf{r}) C(\mathbf{r}). \quad (9)$$

式 (8) は線形積分方程式である式 (4) と同一の形であるため、容易に  $C_0(\mathbf{r})$  について解けることが分かる。推定すべきコントラスト  $C(\mathbf{r})$  は既に推定された  $C_0(\mathbf{r})$ 、式 (9) 及び次式により求めることが可能である。

$$\chi(\mathbf{r}) = 1 + k^2 \int G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') C_0(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (10)$$

ここで  $\chi$  は各々の場所からの寄与の総和である。Born 近似では、全電界を自由空間を想定した場合の入射電界で近似し、これらの電界の相違が場所に依存する効果を無視していた。擬似線形近似では、この問題を解決するために、全電界と入射電界の比が場所に依存する効果を新たな変数  $\chi$  として導入した。このため単純な Born 近似と異なり、複数の強散乱体に対しても鮮

明な像が得られる．しかし，この近似では  $\chi$  が送信アンテナの位置に依存しないことを仮定しているため，実際の全電界を厳密に表現することはできない．この理由により本手法による推定像の精度改善には本質的に限界がある．この問題は次の高次擬似線形近似に対してもいえることである．

Cui ら [22] は一次の擬似線形近似を拡張して高次の擬似線形近似を提案した．彼らは一次の擬似線形近似で用いられる  $\chi(r)$  の代わりに高次の係数  $\chi^{(m)}(r)$  を利用した．高次の係数  $\chi^{(m)}(r)$  は次式で計算される．

$$\chi^{(m+1)}(r) = 1 + A^{(m+1)}(r)\chi^{(m)}, \quad (11)$$

$$A^{(m+1)}(r) = k^2 \int G(r, r') C_0(r') / \chi^{(m)}(r') dr' \quad (12)$$

ここで  $\chi^{(0)}(r) = \chi(r)$  と定義する． $C_0(r') / \chi^{(m)}(r')$  は  $m$  回目の反復で推定されるコントラスト  $C(r')$  である．彼らは二次の擬似線形近似が 0 次及び一次の擬似線形近似と比較して明りょうな推定画像が得られることを適用例により示している．ここで 0 次の擬似線形近似は一次の Born 近似による線形近似と同一であり，次数の意味が異なる．高次擬似線形近似により，計算時間を犠牲にするものの鮮明な画像化が可能となる．この手法と反復 Born 法の特長比較は興味深い課題であり，今後の研究が注目される．

Chew と Wang [23] はひずみ Born 近似と呼ばれる別の方法により Born 近似線形化領域積分方程式 (4) を拡張した．この方法は Born 近似では無視されていた多重散乱を 2 回までのみ考慮した Green 関数を用いる．1 段階前で推定された目標像からの散乱波を既に推定された二重散乱 Green 関数を用いて推定し，実際の受信信号との誤差を打ち消すように二重散乱 Green 関数を更新する．この方法は Roger [24] や Chiu と Kiang [25] の研究で使用された Newton-Kantorovich 法を用いた手法と等価であることが知られている．彼らの手法ではひずみ Born 近似のように Green 関数を更新するのではなく，全電界を更新して誤差を打ち消すことにより推定精度を高めている．Newton-Kantorovich 法とは一般の最適化手法である Newton 法を拡張し，無限次元ベクトルで表現される目標形状の最適化を可能にしたものである．

擬似線形近似とひずみ Born 近似の違いの概要を図 5 に示す．擬似線形近似では全電界を近似するために，入射電界に他目標からの寄与を乗じたものに入射

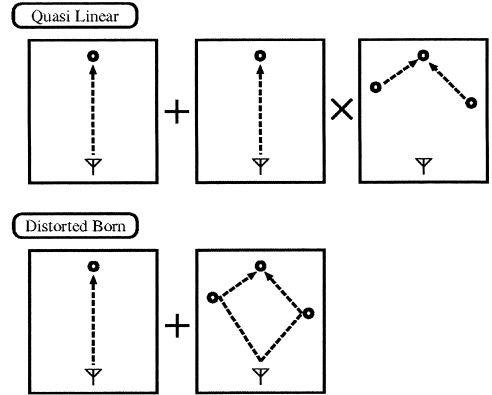


図 5 擬似線形近似及びひずみ Born 近似の全電界の近似法

Fig. 5 The expression of the total field for quasi linear approximation and distorted Born approximation.

電界自体を加えている．一方，ひずみ Born 近似では入射電界に他目標からの回折波を加えて全電界を近似している．Lobel ら [26], [27] はひずみ Born 近似を実験データに適用している．彼らはひずみ Born 近似と共役こう配法による最適化により金属円筒及び金属細片を明りょうに再構成するのに成功している．ひずみ Born 近似による画像化を安定にするために Tikhonov 正則化法の適用が有効であるが，平滑化の効果により推定目標像の分解能が劣化する問題がある．Lobel ら [28] はエッジ保存平滑化法をひずみ Born 近似に適用し，この問題を解決可能なことを示した．彼らの方法は受信アンテナを目標を取り囲むように配置するマイクロ波トモグラフィーである．一方，Dourthe ら [29] は同じ正則化項を GPR に適用し，その有効性を数値計算により示した．

ひずみ Born 近似は反復 Born 法や擬似線形近似と異なり，二重散乱の効果を厳密に記述できるという利点がある．一方で三重以上の散乱効果は考慮されていないため，その性能に限界があることが予想される．今後，多重散乱の効果を含めた手法の計算量の削減が実現されれば，この手法の適用範囲を大きく広げることが可能である．

## 6. 回折トモグラフィー

回折トモグラフィーはレーダ画像化のための手法であり，現在までに多くの研究がなされてきた [30] ~ [33]．回折トモグラフィーは医療用途で広く知られる

X 線 CT (Computed Tomography) 技術を拡張し、回折現象を扱えるようにしたものである。領域積分方程式で Born 近似をすると回折トモグラフィーによる画像化が可能である。Born 近似により線形化された領域積分方程式は周波数領域で容易に扱うことが可能である。二次元問題の場合の回折トモグラフィーの基本式は次式となる。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) = & \mathbf{E}_{\text{inc}}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) \\ & - \frac{k^2}{16\epsilon_0} \int \int C(\mathbf{r}) H_0^{(1)}(k|\mathbf{r}_t - \mathbf{r}|) \\ & H_0^{(1)}(k|\mathbf{r}_r - \mathbf{r}|) d\mathbf{r} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで  $\mathbf{r}_t$  及び  $\mathbf{r}_r$  はそれぞれ送信及び受信アンテナの位置である。 $H_0^{(1)}(\cdot)$  は 0 次の第一種 Hankel 関数である。式 (13) の意味することは、散乱電界は目標形状と Hankel 関数の畳込みで表現されるということである。このため、目標形状  $C(\mathbf{r})$  はデコンボリューション処理により得られることになる。これは周波数領域で逆フィルタを適用することと等価である。回折トモグラフィーは次の四つの手順で実行される。

- 受信データをフーリエ変換し、波数領域で表現する
- データの欠損部分を内挿により求める
- 逆フィルタを適用する
- 逆フーリエ変換し、目標形状の推定像を得る

これらの手順の中で内挿処理は重要であり、適切な内挿処理を用いない場合には像が劣化する。特に、地下探査レーダのようにアンテナ走査範囲が物理的に制限される場合には高波数成分が得られない方向が生じ、画像が大きく劣化する。Nahamoo ら [34] 内挿処理を必要としない回折トモグラフィーを提案した。この手法を適用するためには目標物体を 90 度回転させ、それぞれの場合に対してデータ取得を行う必要があるため、データ取得が不可能な場合もある。Cui ら [35] は回折トモグラフィーの推定像がアンテナの走査幅に大きく依存することを定量的に調査している。

回折トモグラフィーは、Born 近似を用いた画像化処理が復讐不要の変換により実現されるという興味深い性質を利用しており、内挿処理の改良などによりある程度の画像化が達成されている。しかしながら、実際の適用においてはアンテナ走査の自由度などの様々な困難がある。更に、前節に述べた Born 近似自体の適用限界も含めて、更なる特性改善が必要である。

## 7. モデルフィッティング法

モデルフィッティング法はパラメトリックな手法の一種であり、レーダ画像化問題を最適化問題へ帰着させることで一般の最適化手法を利用して画像を得ることができる。最適化問題の作り方によって様々な手法が利用可能であるが、ここでは散乱波を明示的に使用するものをモデルフィッティング法と呼ぶ。先に述べた領域積分方程式を使用する手法は散乱波自体は直接扱わないため、ここでは扱わない。散乱波を明示的に扱う利点は、逆問題を順問題と最適化問題の組合せで表現できることであり、Candy と Pichot [36] はこのことを利用して処理の高速化が実現できることを主張した。モデルフィッティング法では目標モデルのパラメータを反復的に改良して散乱波を用いた評価関数を最適化する。最小化すべき評価関数  $F$  は次式のとおりに定められる。

$$F = \sum_{j,l} |E(t_j, \mathbf{r}_l) - E_{\text{obs}}(t_j, \mathbf{r}_l)|^2, \quad (14)$$

ここで  $E(t, \mathbf{r})$  及び  $E_{\text{obs}}(t, \mathbf{r})$  はそれぞれ推定される電界及び実際に測定される電界のデータであり、 $t$  及び  $\mathbf{r}$  はそれぞれ時間及び場所である。最適化問題により、実際に受信される電界に推定電界が近づくように目標モデルを更新する。推定電界の計算は単純な順問題であり、任意の電磁界計算手法が使用可能である。モデルフィッティング法の計算時間を決めるのは、順問題の計算時間及びモデル更新の計算時間の双方である。

Sato ら [37] は媒質の一樣性を仮定して Green 関数を用いて受信信号の推定を行い、モデルフィッティング法を使用した画像化を行った。一樣媒質中での二次元問題での波動の Green 関数は Hankel 関数となることが知られているが、地下探査レーダなどの応用を想定する場合には Green 関数が未知の不均質媒質により決まる。そこで Sato ら [38] は地下探査レーダの画像化のために、Green 関数を用いる代わりにレイトレーシング法を回折波を扱えるよう拡張し、受信信号の推定を行うことで画像化を実現した。このようにモデルフィッティング法では順問題の性質が扱う対象により大きく異なるため、順問題に対する適切なアルゴリズムの選択が必要である。Rekanos ら [39] は有限要素法により順問題を解くことで画像化を実現している。順問題のためのアルゴリズムとしては FDTD 法やモーメント法などのよく知られている手法も使用可能で



ある。

Sato ら [38] の提案した離散モデルフィッティング法では目標の境界を複数の点目標で表現する境界モデルが使用された。境界モデルを用いることでパラメータ数を減らし、最適化を高速に実現できるため、有利である。一方、Otto と Chew [40] はグリッドモデルを用いたモデルフィッティング法を扱った。グリッドモデルを用いることで境界モデルよりもパラメータ数が多くなる問題を解決するために Otto らは評価関数を線形近似し、高速化を図った。グリッドモデルのように目標モデルの自由度がデータ量に比べて大きい場合には、計算時間が長くなるのみならず条件が不足して解が不安定になる場合がある。Chiu ら [41], [42] は像が滑らかでない場合には測定信号と推定信号が一致しても評価関数  $F$  が小さくならないように評価関数に正則化項を加えることで像の安定化を行った。

Takenaka ら [43] はモデルフィッティングに基づいた FBTS (Forward-Backward Time-Stepping) 法を提案した。FBTS 法では順問題を FDTD 法により解き、受信信号を推定する。推定信号と実際の受信信号との差に相当する等価電流を求め、その電流により生じる電磁波を FDTD 法により逆伝搬させることで目標モデルの修正すべき箇所を特定する。このように目標モデルを更新し、再び受信信号を FDTD 法により推定する。この手順を繰り返し行うことで画像化を実現する。この方法は FDTD 法を用いるために長い計算時間が必要である一方で、異方性を有する目標物体にも適用可能である利点がある。

順問題の処理は目標モデルを変更するたびにを行うため、順問題の呼出し回数を減少させるためには高速な最適化手法が必要となる。最適化手法については Sato ら [37], [38] は改訂 Marquardt 法を、Otto ら [40] や Harada ら [44] は共役こう配法を、Rekanos ら [39] は Polak-Ribiere 非線型共役こう配法を用いている。Polak-Ribiere 非線型共役こう配法は一般の共役こう配法を拡張し、高速化したものである。以上の最適化手法は局所的最適化手法であるため、適切な初期値を与える必要がある。Chiu ら [41], [42] は Green 関数を用いて記述された評価関数が局所的最適解を複数もつことを指摘し、その問題を解決するために遺伝的アルゴリズムを使用し、初期値に依存しない画像化を実現した。しかしながら、遺伝的アルゴリズム (GA) は収束が遅い問題があり、高速な画像化は困難である。Qing と Lee [45], [46] は GA の収束が遅い問題を解決

するために GA と Newton-Kantorovitch 法のハイブリッド法を用いて初期値に依存しない高速な画像化を実現した。Qing [47], [48] は GA の代わりに進化的戦略 (DES) や集団化進化的戦略 (GDES) を用いた画像化についても検討している。GDES においてはすべての個体が複数の集団のうちのいずれかに属し、各々の集団はそれぞれ異なる目標物体の数に対応させる。目標物体の数は未知であるため、様々な目標物体数に対応する個体を扱う必要がある。目標物体数が異なる個体間では遺伝子の構造が大きく異なるために、交叉により生じる次世代個体は親世代個体の表現する目標形状と全く異なるため、収束の遅いランダム探索に近くなってしまふ。そこで異なる集団間での交叉確率を低くすることで収束速度を改善している。

Ferraye ら [3] は等高線変形モデルを用いたモデルフィッティング法を提案した。この手法ではある関数が 0 の値をとる曲線で目標境界を表現している。この関数は目標物体内部では負の値をとり、外部では正の値をとる。このモデルを用いることで陰に正則化がなされる。目標境界モデルは法線方向にのみ移動できる拘束条件のもとで評価関数を最適化する。この手法により複雑な形状の目標物体も推定することが可能であることが示されている。

Sato ら [38] の提案した離散モデルフィッティング法による円筒導体の推定形状を図 6 に示す。同図の目標物体上方のシンボルがアンテナ位置であり、円筒上部に配置された複数の点が推定形状である。点目標の集合が目標の境界に沿って正しく推定されていることが確認される。

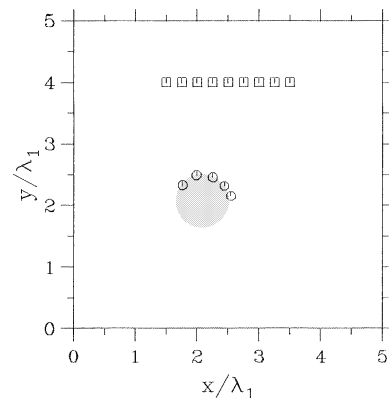


図 6 離散モデルフィッティング法による円筒導体形状推定  
Fig. 6 The estimated target boundary points by the discrete model fitting method.

モデルフィッティング法の特性は対象とする目標物体の有する特徴の自由度に依存して決まる．対象とする目標物体が、あるカタログに記録された有限個のものである場合や、点目標とみなせる場合などの先験情報があれば、目標のモデル化は容易である．その上、最適化すべきパラメータ数は少数となり、モデルフィッティング法は有効に機能する．一方で、室内の任意形状物体の形状推定などの応用に対してはその適用は困難である．物体の形状、個数、次元などによりパラメータ数は大幅に増大し、計算時間及び安定性の双方に大きな問題が生じるためである．

## 8. SEABED 法

本章では筆者らが近年開発してきたレーダによる物体形状推定手法である SEABED 法を紹介する．本手法は高速画像化を可能とするため、室内で周囲の物体形状推定を必要とするロボットなどの用途に対して大きな効果を発揮することが予想されている．本手法の原理は可逆な変換により逆問題の困難を回避するものであり、レーダによる物体像再構成に新たな方向性を示す可能性がある．

従来提案されてきたレーダ画像化手法の多くは地下探査を目的とする地下探査レーダや非破壊検査を目的とするトモグラフィ技術を対象としており、誘電体が連続的に分布する媒質内の構造を推定する問題を解くものである．こうした一般性のある困難な問題を解くためには反復処理や再帰的処理を繰り返す必要がある．反復処理では精度や安定性を優先するために計算時間を犠牲にし、ロボットなどのリアルタイム処理への応用が困難であったため、高速なレーダ画像化手法が望まれていた．空気中の多くの物体は明りょうな境界を有するために、従来手法の扱うモデルは過度に冗長であり、用途を限定することで目標物体のモデルを簡単化することができる．この場合、目標物体モデルとして前述の境界モデルが使用できるために処理が簡単になる．更に、境界モデルを使用することで、目標物体の境界と受信データの間に変換関係が成り立つため、極めて高速な画像化を実現できる．

Sakamoto と Sato [49], [51] は可逆な変換である境界散乱変換 (Boundary Scattering Transform) に基づき、UWB パルスレーダを用いた高速画像化手法である SEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves) 法を開発した．この手法は目標形状とパルスの伝搬遅

延の間に境界散乱変換と呼ばれる可逆な変換関係があることを利用するものである．これは特定の条件下で逆問題であるレーダ画像化が境界散乱変換の逆変換へと帰着可能であることを意味する．この特徴を利用することの利点は得られる画像が近似解ではなく、数学的に厳密な解となっており、しかも反復に基づかずに直接的に画像を得ることが可能であることである．これらの利点により SEABED 法は高速かつ高精度なレーダ画像化を実現することができる．SEABED 法は二次元問題を対象としていたが、Sakamoto と Sato [50] は SEABED 法を三次元へ拡張し、同手法により立体形状推定も高速に行うことが可能であることを示した．ここでは三次元へ拡張された SEABED 法を解説する．

SEABED 法は目標物体が均一な誘電率を有し、明りょうな境界をもつことを要求するが、これらの条件は空気中の物体の多くが自然に満たしているものである．更に背景媒質内での電波の伝搬速度も既知であることを仮定する．UWB パルスの送受信は単一の無指向性アンテナを用いて行うモノスタティックシステムを想定する．このアンテナは平面上を走査され、各々の場所でパルスの送受信を繰り返す．ここでは  $xyz$  座標系内の  $z = 0$  上でアンテナを走査すると仮定する．アンテナ位置  $(x, y, z) = (X, Y, 0)$  で受信された信号を  $s_0(X, Y, Z)$  と定義する．ここで  $Z = ft/2$  とする．ただし、 $t$  は受信時刻、 $f$  はパルスの中心周波数である． $x, y, z, X, Y$  のいずれもパルスの中心波長で正規化する．目標物体やアンテナ位置など、 $(x, y, z)$  で表される空間を実空間 ( $r$ -domain) と呼び、これに対して擬似波面など、 $(X, Y, Z)$  で表される空間をデータ空間 ( $d$ -domain) と呼ぶ．図 7 に想定する座標系やアンテナ走査面を示す．ここで同図では走査面が  $z = 0$  であるように描かれているが、以下に示す適用例では物体の上面 ( $z = 3$ ) を走査する． $s_0(X, Y, Z)$  の  $Z$  に

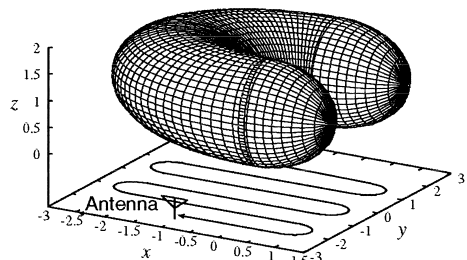


図 7 システムモデルとアンテナ走査

Fig. 7 System model and antenna scanning.

対し整合フィルタを適用することで  $s(X, Y, Z)$  を得る。  $s(X, Y, Z)$  の等位相面を擬似波面と呼び、  $Z$  方向の微係数が 0 となる点  $(X, Y, Z)$  の全体から急に变化しないもの同士を順次接続することにより得られる。この条件は後に述べる式 (17) に示される。目標境界  $(x, y, z)$  と擬似波面  $s(X, Y, Z)$  の間には次式の境界散乱変換 (BST) が成り立つ。

$$\begin{cases} X = x + z\partial z/\partial x \\ Y = y + z\partial z/\partial y \\ Z = z\sqrt{1 + (\partial z/\partial x)^2 + (\partial z/\partial y)^2}, \end{cases} \quad (15)$$

この式は目標境界面上の点  $(x, y, z)$  で強い散乱反射の起こるアンテナ位置  $(X, Y, 0)$  及びレンジ  $Z$  を表したものであり、容易に導くことが可能である。図 8 に目標境界及び擬似波面の例を示す。ただし、簡単のために  $y$  及び  $Y$  方向に一定とし、  $y$  及び  $Y$  軸に垂直な断面を描いている。  $Z$  が  $X$  の大きなところで二つの値をもつのは凹面部分の 2 個所で散乱が生じているためである。一方、この変換に逆変換が存在するならば目標形状  $(x, y, z)$  が直接得られるため、高速な形状推定が実現できる。

$$\begin{cases} x = X - Z\partial Z/\partial X \\ y = Y - Z\partial Z/\partial Y \\ z = Z\sqrt{1 - (\partial Z/\partial X)^2 - (\partial Z/\partial Y)^2}, \end{cases} \quad (16)$$

SEABED 法は式 (16) の右辺を計算することにより目標形状推定を実現する。図 8 のように擬似波面が 2 値関数であっても擬似波面を両方抽出し、それぞれに対して逆変換を行うことで形状推定が実現される。式 (16) において  $z$  が実数であるために

$$(\partial Z/\partial X)^2 + (\partial Z/\partial Y)^2 < 1 \quad (17)$$

が必要である。この式が示すとおり、擬似波面はこう配に上限があり、擬似波面を抽出する際の手掛りとして使用している。

擬似波面抽出までの手順を SEABED 法の適用例を示しながら説明する。ここでは簡単のために二次元問題の場合を示すが、三次元問題の場合も同様の処理を行う。図 9 にここで擬似波面抽出の適用例に用いる目標物体を示す。同図の  $x$  軸に沿って無指向性アンテナを走査し、  $0.125\lambda$  ごとに UWB 信号を送受信する。

(1) 整合フィルタの適用

図 10 に数値的に作成した受信信号波形の例を示す。同図の複数の信号は、各々のアンテナ位置  $X$  でモノ

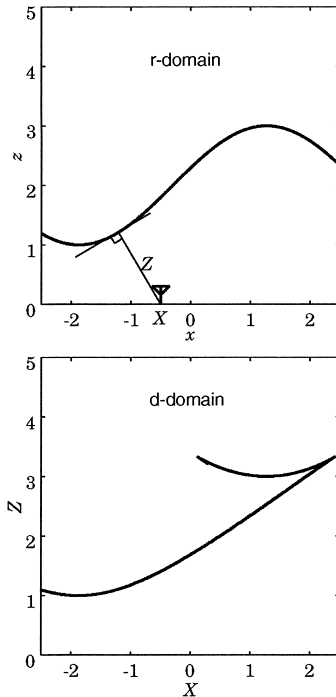


図 8 目標境界と擬似波面の例 ( $y, Y$  方向に一定の場合)  
Fig.8 An example of a target shape and the quasi-wavefront.

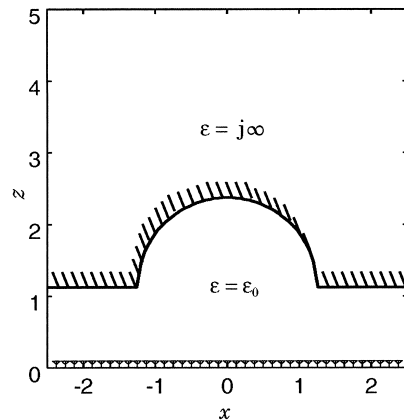


図 9 二次元の擬似波面抽出例に用いる目標形状  
Fig.9 An example target shape for the extraction of 2-D quasi-wavefront.

サイクルパルスを送受信して得られた受信信号である。これらの信号は受信信号に対し、送信信号に整合したフィルタを適用したものである。同図の  $Z$  は受信信号の時間軸に相当するので、信号を自然に図示するために縦軸と横軸の関係が図 8 と逆になっていることに注意されたい。

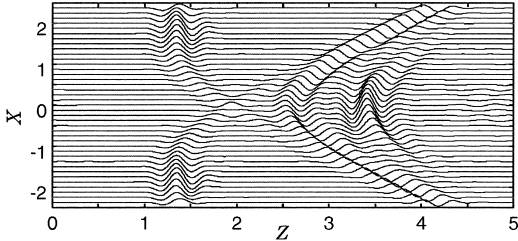


図 10 目標物体からの受信信号  
Fig. 10 The received signals from a target.

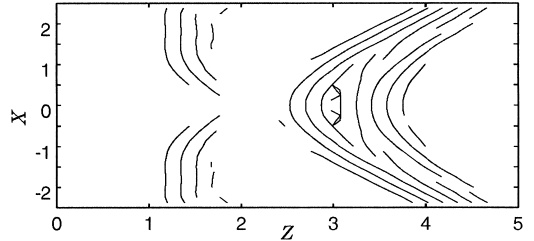


図 12 候補点から推定された擬似波面  
Fig. 12 Estimated quasi wavefronts from the candidate points.

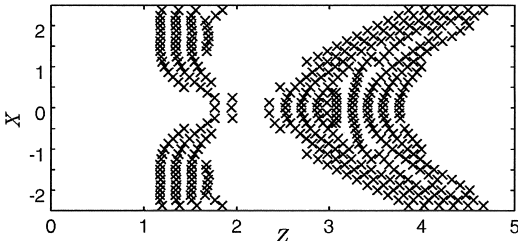


図 11 擬似波面の候補点の抽出例  
Fig. 11 Candidate points for the wavefront estimation.

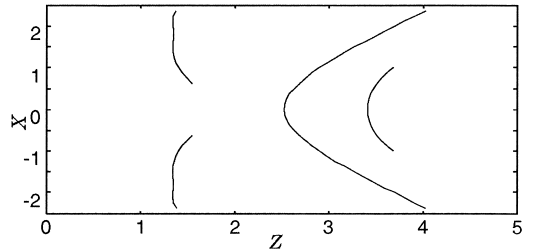


図 13 評価値に基づいて選択された擬似波面  
Fig. 13 Selected quasi wavefronts by the evaluation values.

(2) 擬似波面の候補点の抽出

次に、受信信号から擬似波面の候補となる点を抽出する。各々のアンテナ位置に対して  $\partial s(X, Y, Z) / \partial Z = 0$  となる点のうち  $|s(X, Y, Z)|^2$  の大きなものを選ぶ。こうして得られる点を図 11 に示す。同図より、点列が滑らかに続いている部分が確認される。

(3) 候補点からの擬似波面の抽出

次に候補点から擬似波面を推定する。各々の候補点から隣の  $X$  上の候補点のうちで式 (17) を満たすものを順次選び、接続していく。こうして得られる擬似波面を図 12 に示す。同図には、相互相関関数のもつ複数のピークにより多くの曲線が抽出されている。

(4) 評価値による擬似波面の選択

最後に、評価値に基づいて多くの擬似波面から有意なもののみを選択する処理を行う。それぞれの擬似波面に沿って信号振幅を足し合わせたものの大きさ  $|\sum s(X, Y, Z)|^2$  を評価値として、しきい値以上のもののみを選択する。この結果として得られる最終的な擬似波面を図 13 に示す。

こうして  $X$  の 1 変数関数として擬似波面  $Z$  が得られる。三次元の場合には擬似波面は  $X$  及び  $Y$  の 2 変数関数として擬似波面  $Z$  が抽出され、前述の逆境界散乱変換を適用することにより、最終的な像を得る。

次に SEABED 法による立体形状の推定例を示す。

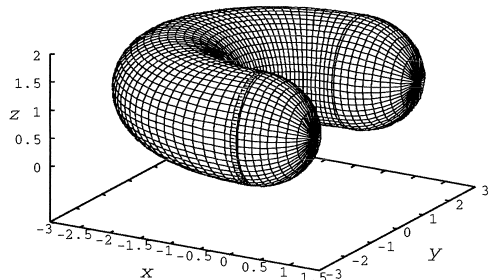


図 14 立体目標形状推定の適用例に用いる真の目標形状  
Fig. 14 The true target shape for the 3-D target shape estimation.

真の目標形状は図 14 にある U 字型の物体とし、0.1 波長間隔の  $51 \times 51$  点での受信信号から形状推定を行う。受信信号は数値的に作成した。偏波は  $x$  方向の直線偏波とし、受信についても同方向の電界のみを記録している。SEABED 法により推定される形状を図 15 に示す。アンテナ走査面を目標の上方  $z = 3$  としているため、目標物体の上半分が推定されている。SEABED 法により目標形状は高精度に推定されており、図 15 を得るのに必要な計算時間は単一の Xeon2.8GHz プロセッサを用いて約 0.1s と非常に短い。更に、SEABED 法では擬似波面を抽出することで無関係なパルス同士が干渉することがなく、合成開

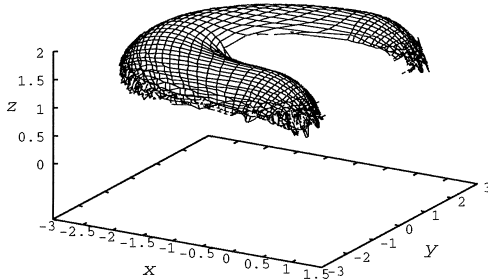


図 15 SEABED 法による推定形状

Fig. 15 Estimated 3-D target shape by the SEABED method.

口処理で生じる虚像の問題が生じない利点を有する。しかし、目標形状によっては散乱波形が送信波形と大きく異なる場合があり、その場合には SEABED 法による推定形状に大きな誤差が生じる。この問題を解決するために、擬似波面の特徴を用いて波形の変化を補償することで SEABED 法の推定精度を大幅に改善する手法も開発されている [51]。更に、SEABED 法による高速画像化は実験的にもその有効性が確認されている [52]。

以上のとおり、SEABED 法には従来手法にはない多くの利点を有する。特に、SEABED 法の処理の高速性はリアルタイム用途へのレーダ画像化技術の応用を可能にする重要な要素である。しかしながら、本手法を適用するためには目標物体が明りような境界を有するという条件を要する。また、多重反射が卓越するケースについては対応できない場合があるなど、対象はある程度単純な形状に限定される。精度に関しては、文献 [51] の技術を使用する場合には雑音のない状況で 0.1 波長程度となり、合成開口処理による波長程度の分解能と比較すると有利である。この精度を更に改善するためには、SEABED 法で使用する整合フィルタを適切に選ぶことが必要である。なぜなら、SEABED 法で使用する整合フィルタは受信波形ではなく送信波形に適したものであるため、両波形の違いが精度劣化の原因になっているためである。今後、目標形状に課せられる条件を緩和するための技術や高精度化により実用技術に近づけることが課題となる。

## 9. む す び

本論文ではレーダ画像化アルゴリズムの多くの研究について述べた。目標物体のモデル化やパラメトリックか否かの区別により、多くの研究同士がどのような

関係にあるのかを明らかにした。一般にパラメトリックな手法は計算時間や不安定性の問題があり、ノンパラメトリックな手法は像の劣化や虚像の出現といった問題があることを述べた。更に、筆者らが近年行ってきた新たなアプローチである SEABED 法について述べた。SEABED 法は目標が明りような境界を有する条件下で可逆な変換関係が成り立つことを利用したものであり、極めて高速な画像化を実現することを示した。今後、本論文で考察した多くの手法の優劣や特徴を考慮に入れ、目的に応じた処理を選択することが重要である。

## 文 献

- [1] 佐藤源之, “地中レーダによる地下イメージング,” 信学論 (C), vol.J85-C, no.7, pp.520–530, July 2002.
- [2] D.L. Mensa, High Resolution Radar Cross-Section Imaging, Fourth ed., Artech House, 1991.
- [3] R. Ferraye, J.-Y. Dauvignac, and C. Pichot, “An inverse scattering method based on contour deformations by means of a level set method using frequency hopping technique,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.51, no.5, pp.1100–1113, 2003.
- [4] J.P. Fitch, Synthetic Aperture Radar, Springer-Verlag, New York, 1988.
- [5] W.M. Boerner and Y. Yamaguchi, “Wideband polarimetry, interferometry and polarimetric interferometry in synthetic aperture remote sensing,” IEICE Trans. Commun., vol.E83-B, no.9, pp.1906–1915, Sept. 2000.
- [6] S. Cloude, K.P. Papathanassiou, and E. Pottier, “Radar polarimetry and polarimetric interferometry,” IEICE Trans. Electron., vol.E84-C, no.12, pp.1814–1822, Dec. 2001.
- [7] T. Suzuki and I. Arai, “Advance on underground radars,” IEICE Trans. Commun., vol.E74-B, no.2, pp.289–294, Feb. 1991.
- [8] E.J. Bond, X. Li, S.C. Hagness, and B.D. van Veen, “Microwave imaging via space-time beamforming for early detection of breast cancer,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.51, no.8, pp.1690–1705, 2003.
- [9] R.M. Narayanan, X. Xu, and J.A. Henning, “Radar penetration imaging using ultra-wideband (UWB) random noise waveforms,” IEE Proc.-Radar Sonar Navig., vol.151, no.3, pp.143–148, 2004.
- [10] J. van der Kruk, C.P.A. Wapenaar, J.T. Fokkema, and P.M. van den Berg, “Three-dimensional imaging of multicomponent ground-penetrating radar data,” Geophysics, vol.68, no.4, pp.1241–1254, 2003.
- [11] M.B. Dobrin and C.H. Savit, Introduction to Geophysical Prospecting, Fourth ed., McGraw-Hill, 1988.
- [12] C.J. Leuschen and R.G. Plumb, “A matched-filter-based reverse-time migration algorithm for ground-penetrating radar data,” IEEE Trans. Geosci. Re-

- mote Sens., vol.39, no.5, pp.929–936, May 2001.
- [13] A. Franchois and C. Pichot, “Microwave imaging — Complex permittivity reconstruction with a Levenberg-Marquardt method,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.45, no.2, pp.203–215, 1997.
- [14] A. Abubakar, P.M. Berg, and B.J. Kooij, “A conjugate gradient contrast source technique for 3D profile inversion,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E83-C, no.12, pp.1864–1874, Dec. 2000.
- [15] S.D. Rajan and G.V. Frisk, “A comparison between the Born and Rytov approximations for the inverse backscattering problem,” *Geophysics*, vol.54, no.7, pp.864–871, 1989.
- [16] N.V. Budko, R.F. Remis, and P.M. Berg, “Two-dimensional imaging and effective inversion of a three-dimensional buried object,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E83-C, no.12, pp.1889–1895, Dec. 2000.
- [17] M. Moghaddam and W.C. Chew, “Study of some practical issues in inversion with the Born iterative method using time-domain data,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.41, no.2, pp.177–184, 1993.
- [18] P. Chaturvedi and R.G. Plumb, “Electromagnetic imaging of underground targets using constrained optimization,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.33, no.3, pp.551–561, 1995.
- [19] Y. Yu, T. Yu, and L. Carin, “Three-dimensional inverse scattering of a dielectric target embedded in a lossy half-space,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.42, no.5, pp.957–973, 2004.
- [20] M.S. Zhdanov and S. Fang, “Three-dimensional quasilinear electromagnetic inversion,” *Radio Sci.*, vol.31, no.4, pp.741–754, 1996.
- [21] C. Zhou and L. Liu, “Radar-diffraction tomography using the modified quasi-linear approximation,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.38, no.1, pp.404–415, 2000.
- [22] T.J. Cui, Y. Qin, G.L. Wang, and W.C. Chew, “High-order inversion formulas for low-frequency imaging of 2D buried targets,” *Proc. 2004 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol.1, pp.189–192, 2004.
- [23] W.C. Chew and Y.M. Wang, “Reconstruction of two dimensional permittivity distribution using the distorted Born iterative method,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol.9, no.2, pp.218–225, 1990.
- [24] A. Roger, “Newton-Kantorovitch algorithm applied to an electromagnetic inverse problem,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.29, no.3, pp.232–238, 1981.
- [25] C.C. Chiu and Y.W. Kiang, “Microwave imaging of multiple conducting cylinders,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.40, no.8, pp.933–941, 1992.
- [26] P. Lobel, R.E. Kleinman, C. Pichot, L. Blanc-Feraud, and M. Barlaud, “Conjugate-gradient method for solving inverse scattering with experimental data,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol.38, no.3, pp.48–51, June 1996.
- [27] P. Lobel, C. Pichot, L. Blanc-Feraud, M. Barlaud, and A.K. Louis, “Image reconstruction from the 1997 Ipswich data using a conjugate-gradient algorithm,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol.41, no.1, pp.48–51, Feb. 1999.
- [28] P. Lobel, C. Pichot, L. Blanc-Feraud, and M. Barlaud, “Microwave imaging: Reconstructions from experimental data using conjugate gradient and enhancement by edge-preserving regularization,” *Int. J. Imaging Syst. Technol.*, vol.8, no.4, pp.337–342, Dec. 1998.
- [29] C. Dourthe, C. Pichot, J.Y. Dauvignac, L. Blanc-Feraud, and M. Barlaud, “Regularized bi-conjugate gradient algorithm for tomographic reconstruction of buried objects,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E83-C, no.12, pp.1858–1863, Dec. 2000.
- [30] A.J. Devaney, “Geophysical diffraction tomography,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.22, no.1, pp.3–13, 1984.
- [31] C. Pichot, L. Jofre, G. Peronnet, and J.C. Bolomey, “Active microwave imaging of inhomogeneous bodies,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.33, no.4, pp.416–425, 1985.
- [32] T.B. Hansen and P.M. Johansen, “Inversion scheme for monostatic ground penetrating radar that takes into account the planar air-soil interface,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.38, no.1, pp.496–506, Jan. 2000.
- [33] T.J. Cui and W.C. Chew, “Diffraction tomographic algorithm for the detection of three-dimensional objects buried in a lossy half space,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.50, no.1, pp.42–49, Jan. 2002.
- [34] D. Nahamoo, S.X. Pan, and A.C. Kak, “Synthetic aperture diffraction tomography and its interpolation-free computer implementation,” *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol.31, no.4, pp.218–229, 1984.
- [35] T.J. Cui, W.C. Chew, X.X. Yin, and W. Hong, “Study of resolution and super resolution in electromagnetic imaging for half-space problems,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.52, no.6, pp.1398–1411, 2004.
- [36] J.V. Candy and C. Pichot, “Active microwave imaging: A model-based approach,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.39, no.3, pp.285–290, 1991.
- [37] T. Sato, K. Takeda, T. Nagamatsu, T. Wakayama, I. Kimura, and T. Shinbo, “Automatic signal processing of front monitor radar for tunnelling machines,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.35, no.2, pp.354–359, 1997.
- [38] T. Sato, T. Wakayama, and K. Takemura, “An imaging algorithm of objects embedded in a lossy dispersive medium for subsurface radar data processing,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.38, no.1,

- pp.296–303, 2000.
- [39] I.T. Rekanos, T.V. Yioultis, and T.D. Tsiboukis, “Inverse scattering using the finite-element method and a nonlinear optimization technique,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.47, no.3, pp.336–344, 1999.
- [40] G.P. Otto and W.C. Chew, “Microwave inverse scattering - local shape function imaging for improved resolution of strong scatterers,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.42, no.1, pp.137–142, 1994.
- [41] C.C. Chiu and W.T. Chen, “Electromagnetic imaging for an imperfectly conducting cylinder by the genetic algorithm,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.48, no.11, pp.1901–1905, 2000.
- [42] C. Chiu, C. Li, and W. Chan, “Image reconstruction of a buried conductor by the genetic algorithm,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. E84-C, no.12, pp.1946–1951, Dec. 2001.
- [43] T. Takenaka, H. Jia, and T. Tanaka, “Microwave imaging of an anisotropic cylindrical object by a forward-backward time-stepping method,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. E84-C, no.12, pp.1910–1916, Dec. 2001.
- [44] H. Harada, D. Wall, T. Takenaka, and M. Tanaka, “Conjugate gradient method applied to inverse scattering problem,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.43, no.8, pp.784–792, 1995.
- [45] A. Qing and C.K. Lee, “A study on improving the convergence of the real-coded genetic algorithm for electromagnetic inverse scattering of multiple perfectly conducting cylinders,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E85-C, no.7, pp.1460–1471, July 2002.
- [46] A. Qing, “Electromagnetic imaging of two-dimensional perfectly conducting cylinders with transverse electric scattered field,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.50, no.12, pp.1787–1794, 2002.
- [47] A. Qing, “Electromagnetic inverse scattering of multiple two-dimensional perfectly conducting objects by differential evolution strategy,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.51, no.6, pp.1251–1262, 2003.
- [48] A. Qing, “Electromagnetic inverse scattering of multiple perfectly conducting cylinders by differential evolution strategy with individuals in groups,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.52, no.5, pp.1223–1229, 2004.
- [49] T. Sakamoto and T. Sato, “A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E87-B, no.5, pp.1357–1365, May 2004.
- [50] T. Sakamoto and T. Sato, “A fast algorithm of 3-dimensional imaging for pulse radar systems,” *Proc. 2004 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, vol.2, pp.2099–2102, June 2004.
- [51] T. Sakamoto and T. Sato, “A phase compensation algorithm for high-resolution pulse radar systems,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E87–B, no.11, pp.3314–3321, Nov. 2004.
- [52] T. Sakamoto, S. Kidera, T. Sato, T. Mitani, and S. Sugino, “An experimental study on a fast imaging algorithm for UWB pulse radar systems,” *Proc. 2005 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, p.24.5 July 2005.

(平成 17 年 5 月 6 日受付, 6 月 15 日再受付)



佐藤 亨 (正員)

昭 51 京大・工・電気第二卒・昭 56 同大大学院博士課程了。同超高層電波研究センター助手, 工学部講師, 同助教を経て, 平 10 より同大学院情報学研究科通信情報システム専攻教授。レーダによる降雨, 中層・超高層大気, 軌道運動物体のリモートセンシング並びに地下探査等のレーダ信号処理の研究に従事。日本航空宇宙学会, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 文化財探査学会, IEEE, 米国気象学会会員。工博。



阪本 卓也 (正員)

平 12 京大・工・電気電子工卒。平 17 同大大学院情報学研究科通信情報システム専攻博士課程了。同大学院 COE 研究員を経て, 平 17 より同大学院情報学研究科知能情報学専攻にて日本学術振興会特別研究員 PD。UWB パルスレーダによる画像化アルゴリズムの研究に従事。アンテナ伝播国際シンポジウム論文賞(平 16)受賞。電気学会, IEEE 各会員。京都大学博士(情報学)。