

部分境界散乱変換を用いたUWBパルスレーダのための推定像安定化手法

阪本 卓也[†] 佐藤 亨^{††}

[†] 京都大学大学院情報学研究科 知能情報学専攻

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

^{††} 京都大学大学院情報学研究科 通信情報システム専攻

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

あらまし UWBパルスレーダは救助用ロボットなどの状況測定手法の有望な候補の一つである。レーダによる近傍物体の形状推定問題は設定不適切逆問題の一種として知られ、多くの研究がなされてきた。しかし、いずれの手法も長い計算時間を必要とし、リアルタイム動作に必要なロボットなどへ応用することは困難であった。筆者らはUWBパルスレーダのための高速形状推定手法であるSEABED法を提案してきた。この手法は、形状とデータの間になり立つ可逆な変換である境界散乱変換に基づくことにより従来法では達成し得なかった高速な処理を実現する。しかしながら、境界散乱変換は微分操作を含むために雑音環境下では像が劣化する問題を有している。この問題を解決するために、凸物体に対して成り立つ滑らかさに関する不等式を用いた平滑化手法を提案し、安定に形状推定が実現されることを確認した。ただし、この手法は凸物体のみに特化しており、凹面を含む物体に対しては適用できない。本論文では境界散乱変換を拡張した部分境界散乱変換を考え、この変換の性質を利用した像の安定化手法を提案し、適用例を示す。部分境界散乱変換を用いることにより、物体の凹凸に依存せずに像の安定化が実現されることを示す。

キーワード 部分境界散乱変換, UWBパルスレーダ, 形状推定, 安定化

An image stabilization method with the fractional boundary scattering transform for UWB pulse radars

Takuya SAKAMOTO[†] and Toru SATO^{††}

[†] Department of Intelligence Science and Technology,
Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

^{††} Department of Communications and Computer Engineering,
Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

Abstract The UWB pulse radar is one of promising candidates for environment measurement method for rescue robots. Radar imaging of a nearby target is known as one of ill-posed inverse problems, for which a various studies have been done. However, conventional algorithms require long computational time, which makes it difficult to apply them to a realtime operation of robots. We have proposed a fast radar imaging algorithm, SEABED algorithm, for UWB pulse radars. This algorithm is based on a reversible transform, BST (Boundary Scattering Transform), between the target shape and the observed data. This transform enables us to estimate target shapes quickly and accurately in a noiseless environment. However, the estimated image by SEABED algorithm is degraded in a noisy environment because BST utilizes the differential operation. We have also proposed an image stabilization method, which utilizes the upper bound of the smoothness of received data. This method can be applied only to convex objects, not to concave objects. In this paper, we propose a fractional BST, which is obtained by expanding the conventional BST, and an image stabilization method by using the fractional BST. We show that the estimated image can be stabilized regardless of the shape of target.

Key words fractional boundary scattering transform, UWB pulse radar, shape estimation, stabilization

1. はじめに

UWB パルスレーダは、近い将来に実現が期待される救助用ロボットなどの状況測定手法の有力な候補である。レーダによりアンテナ近傍の物体形状を推定する問題は設定不適切逆問題の一種として知られ、多くの研究がなされてきた。合成開口処理はそのうちの一つであるが、分解能が波長程度に制限されるという制約がある [1] ~ [3]。マイグレーション法は弾性探査にしばしば用いられる手法であるが、FDTD 法を用いてレーダに適用できるよう拡張した手法が検討されている [4]。また、領域積分方程式を用いた手法はターゲットをグリッド上の誘電率で表現するために汎用性に優れる [5] ~ [7]。離散モデルフィッティング法は目標の境界を点目標の集合で表現することで適切に自由度を減少させ、最適化により形状推定を行う [8]。これらの従来手法は反復計算に基づくために長い計算時間が必要であり、ロボットなどのリアルタイム用途への応用は困難である問題があった。

こうした計算時間の問題を解決するために、我々は境界散乱変換 (Boundary Scattering Transform; 以下 BST と略す) に基づいた高速な形状推定法を提案してきた [9] ~ [13]。我々はこのアルゴリズムを SEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves) と呼ぶ。SEABED 法は目標形状とデータの間になり立つ可逆な変換関係である境界散乱変換により、反復に基づくことなく目標形状をデータから直接推定できる特徴を有する。この境界散乱変換は受信信号から推定される疑似波面と呼ばれる曲線の微係数を用いるために、雑音環境下では推定像が劣化するという問題があった。

そこで我々は凸物体の疑似波面の滑らかさを保証する上限式を導き、疑似波面の形状に応じて適応的に平滑化を行い、推定像の安定化が実現できることを示した [14]。この手法は目標が凸物体のときには有効に機能する一方で、凹面を含む目標に対しては推定像に大きな誤差を生じる原因となる。本論文では、任意の目標物体に対して安定な像を得るための安定化手法を提案する。まず、可逆な変換である境界散乱変換を拡張した部分境界散乱変換を導く。部分境界散乱変換により実空間とデータ空間の間の部分変換空間を扱うことが可能となる。実空間とデータ空間では滑らかさが満たされない場合であっても、疑似波面の部分変換空間での表現である部分変換疑似波面は滑らかさが保証される。このため、部分変換空間での平滑化を利用することで従来手法では不可能であった安定な形状推定が実現される。本論文では、部分境界散乱変換を用いた平滑化の原理及びその適用例を示す。

2. システムモデル

本稿ではモノスタティックレーダシステムを扱う。無指向性アンテナを走査しながらモノサイクルパルスの送受信を繰り返すことで得られる受信波を A/D 変換し、メモリ内に保存する。得られるデータから信号処理により目標の形状を推定する。本稿では 2 次元問題を扱い、電波の伝播は TE 波とする。目標及

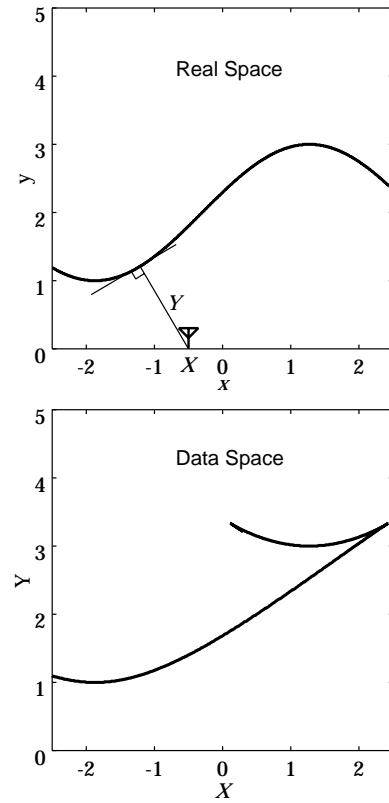


図 1 目標境界と疑似波面の例

Fig. 1 An example of a target shape and a quasi wavefront.

びアンテナは、図 1 上図に示すように平面内に存在すると仮定し、目標は明瞭な境界を有し、均一な誘電率で満たされた物体であると仮定する。目標及びアンテナが存在する空間を実空間と呼ぶ。実空間の点を (x, y) で表現する。ここで x 及び y はいずれも真空中での送信パルスの中心波長 λ により正規化する。但し $y > 0$ とする。アンテナの走査は実空間の x 軸上とする。アンテナの位置 $(x, y) = (X, 0)$ での受信電界を $s'(X, Y)$ と定義する。但し、 Y は送信からの時間 t 及び真空中の光速 c を用いて $Y = ct/(2\lambda)$ と定義する。 $y > 0$ であるため、 $Y > 0$ が成り立つ。但し、アンテナの位置における電界の瞬時包絡線が最大となる時刻を $t = 0$ とする。雑音除去を目的として $s'(X, Y)$ の Y 方向に送信波形を用いた整合フィルタを適用することで得られる受信波形を新たに $s(X, Y)$ と呼び、処理に用いる。 (X, Y) で表現される空間をデータ空間と呼ぶ。図 1 下図は、上図の物体形状に対するデータ空間の例を示す。ここで X 及び Y はそれぞれ送信パルスの中心波長及び送信パルスの中心周期で正規化されている。本稿では $s(X, Y)$ を用いて目標形状を推定する問題を扱う。データ空間から実空間への変換は形状推定に他ならない。

3. SEABED アルゴリズム

3.1 境界散乱変換と逆変換

本節では SEABED 法を簡単に説明する。SEABED 法は目標形状とパルスの遅延時間の間に成り立つ可逆な変換関係が存在することを利用した手法である。SEABED 法は目標形状を

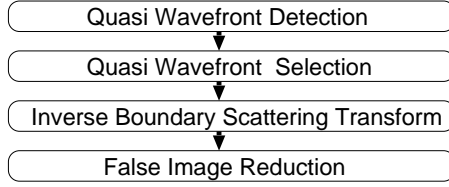


図 2 SEABED 法の概要

逆変換により直接的に推定可能であり、その解は数学的に逆問題の正確な解となっている。SEABED 法は疑似波面と目標形状の間の可逆な変換関係が存在することを利用した手法である。電磁波の伝播速度は既知であるとする。本稿では簡単のため、目標からの散乱波の伝播経路は全て真空であるとする。

2次元の境界散乱変換は次式で表わされる [9]。

$$X = x + ydy/dx \quad (1)$$

$$Y = y\sqrt{1 + (dy/dx)^2} \quad (2)$$

ここで (X, Y) の軌跡を疑似波面と呼ぶ。 (x, y) は目標境界面上の点であり、 $y > 0$ 及び $Y > 0$ を仮定する。

境界散乱変換の逆変換は次式で表わされる。

$$x = X - YdY/dX \quad (3)$$

$$y = Y\sqrt{1 - (dY/dX)^2} \quad (4)$$

式 (4) の y が実数となる条件より $|dY/dX| \leq 1$ が満たされる必要がある。この条件は疑似波面を推定する際に手がかりとして使用することができる。式 (3) 及び (4) を逆境界散乱変換 (Inverse Boundary Scattering Transform; 以下 IBST と略す) と呼ぶ。

SEABED 法では最初に、 $s(X, Y)$ から疑似波面の抽出を行なう。疑似波面は $ds(X, Y)/dY = 0$ 及び $|dY/dX| \leq 1$ の条件を満たすように選ぶ。後者の条件は式 (4) の Y が実数となるために必要である。更に、干渉波を防ぐ目的で条件 $|s(X_i, Y_i)/s(X_{i+1}, Y_{i+1})| < T_r$ を課す。ここで (X_i, Y_i) 及び (X_{i+1}, Y_{i+1}) は隣合う疑似波面上の点である。この条件は同一の疑似波面内での大きな振幅変化を除外するために導入したものである。疑似波面として点集合 (X, Y) を逐次抽出し、大きな電力を有するものを選択し、不要成分を除去する。最後に、抽出した疑似波面に IBST を適用し、目標形状を推定する。図 2 に SEABED 法の概要を示す。

3.2 疑似波面平滑化と物体形状

前節で述べた手法は雑音が無視しうる環境下では有効に動作することが確認されている。しかし、実際に受信される信号には雑音が含まれており、そこから抽出される疑似波面は不規則成分を含む。形状推定に用いる逆境界散乱変換は疑似波面の微分操作を含むため、不規則成分が拡大され、像の劣化を引き起こす問題がある。この問題を解決するために、我々は凸物体に対応する疑似波面の 2 階導関数が上限を有することを用いた平滑化により、推定像の安定化が実現できることを提唱してきた [14]。2 階導関数の絶対値が小さい場合には長い相関長で平滑化が可能である。疑似波面の 2 階導関数は目標形状を用いて

次式で表される。

$$\frac{d^2Y}{dX^2} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\{1 + (\frac{dy}{dx})^2\}^{3/2}\{1 + (\frac{dy}{dx})^2 + y\frac{d^2y}{dx^2}\}} \quad (5)$$

同式の分子は目標形状の 2 階導関数 $\frac{d^2y}{dx^2}$ となっており、目標形状に依存する。分母の前半 $\{1 + (\frac{dy}{dx})^2\}^{3/2}$ は常に 1 より大きく、2 階導関数の絶対値を小さくする効果がある。一方、後半の $1 + (\frac{dy}{dx})^2 + y\frac{d^2y}{dx^2}$ については、

(1) 目標が凸物体の場合

$\frac{d^2y}{dx^2} > 0$ となるために $1 + (\frac{dy}{dx})^2 + y\frac{d^2y}{dx^2} > 1$ となり、疑似波面が滑らかになる。平滑化が容易である。

(2) 目標の 2 階導関数が大きい場合 (点目標やエッジなど)

分子の $\frac{d^2y}{dx^2}$ と分母が相殺して疑似波面の 2 階導関数が非常に小さくなる。平滑化が容易である。

(3) 目標が凹面を含む場合

$\frac{d^2y}{dx^2} < 0$ となる場所では $1 + (\frac{dy}{dx})^2 > 1$ に $y\frac{d^2y}{dx^2} < 0$ が足し合わされ、場合によっては $1 + (\frac{dy}{dx})^2 + y\frac{d^2y}{dx^2} < 1$ となったり、発散する場合もある。平滑化が困難になる。

以上のうち、第 1 及び第 2 の場合には疑似波面を平滑化した後に逆境界散乱変換を適用することで推定像の安定化が実現できる。一方、第 3 の場合には疑似波面の平滑化が正常に動作せずに推定形状が劣化する。この場合には疑似波面よりも実空間の方が滑らかな曲線となるため、疑似波面の平滑化が適切でないためである。このため、疑似波面平滑化手法は凹面を含む物体に適用することができなかった。本論文では境界散乱変換を拡張した部分境界散乱変換を用いることでこの問題を解決する手法を提案する。

4. 部分境界散乱変換

4.1 部分境界散乱変換と部分逆境界散乱変換

本節では、前節で説明した境界散乱変換を拡張した部分境界散乱変換について述べる。部分境界散乱変換を用いた平滑化法については次節で説明する。部分境界散乱変換を次式で定義する。

$$x_\alpha^B = x + \alpha y \frac{dy}{dx} \quad (6)$$

$$y_\alpha^B = y \sqrt{1 + \alpha \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (7)$$

式 (7) には、元の境界散乱変換の式には含まれないパラメータ α ($0 \leq \alpha \leq 1$) が含まれている。この変換を FBST (Fractional BST) (α) と呼ぶ。実空間からパラメータ α で部分境界散乱変換した (x_α^B, y_α^B) を部分変換疑似波面と呼ぶ。 (x_α^B, y_α^B) で表される空間を部分変換空間と呼ぶ。 $\alpha = 1$ の場合には部分変換疑似波面は従来の疑似波面に一致する。また、 $\alpha = 0$ の場合には部分変換疑似波面は目標形状と一致する。同様に、部分逆境界散乱変換は次式で定義される。

$$x_\alpha^I = X - \alpha Y \frac{dY}{dX} \quad (8)$$

$$y_\alpha^I = Y \sqrt{1 - \alpha \left(\frac{dY}{dX}\right)^2} \quad (9)$$

同式の左辺で表される曲線を部分逆変換疑似波面と呼ぶ。部分境界散乱変換と同様に、この変換を FIBST(Fractional IBST)(α) と呼ぶ。パラメータ α については部分境界散乱変換と同様に $0 \leq \alpha \leq 1$ とする。一般に疑似波面の導関数については $|dY/dX| < 1$ を満足するため、 $0 \leq \alpha \leq 1$ であれば式 (9) の第 2 式左辺は実数となる。部分境界散乱変換と部分逆境界散乱変換は、従来別々に扱っていた実空間とデータ空間の中間の空間を考えることに相当する。

4.2 部分変換疑似波面の一意性

簡潔に記述するために部分変換疑似波面ベクトル $f_B(\alpha) = [x_\alpha^B, y_\alpha^B]^T$ 及び $f_I(\alpha) = [x_\alpha^I, y_\alpha^I]^T$ を定義する。部分変換疑似波面ベクトルを用いると目標形状は次の 2 通りで表される。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = f_B(0) = f_I(1) \quad (10)$$

同様に、疑似波面も次の 2 通りで表される。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = f_B(1) = f_I(0) \quad (11)$$

以上で述べた $\alpha = 0$ 及び $\alpha = 1$ の場合以外の一般の場合の部分境界散乱変換と部分逆境界散乱変換の関係について調べる。式 (2) を dy/dx について解くことで次式を得る。

$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{\frac{Y^2}{y^2} - 1} \quad (12)$$

この式に式 (2) を代入することで次式を得る。

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy/dx}{\sqrt{1 - (dy/dx)^2}} \quad (13)$$

式 (1), (2) 及び (13) を式 (7) に代入することで次式を得る。

$$x_\alpha^B = X - (1 - \alpha)Y \frac{dY}{dX} \quad (14)$$

$$y_\alpha^B = Y \sqrt{1 - (1 - \alpha) \left(\frac{dY}{dX} \right)^2} \quad (15)$$

この式は式 (9) の部分逆境界散乱変換の α を $1 - \alpha$ に置き換えたものである。すなわち、部分境界散乱変換 (α) は部分逆境界散乱変換 ($1 - \alpha$) と同一のものであることがわかる。これは実空間から FIBST(α) により移る空間と疑似波面から FIBST($1 - \alpha$) により移る空間が矛盾なく定義できることを意味する。このことを式で書くと $f_B(\alpha) = f_I(1 - \alpha)$ となる。このため、部分逆変換疑似波面を考える必要がないため、以下では全て部分変換疑似波面に統一し、 $f(\alpha) = f_B(\alpha)$ と書く。更に、式 (7) 及び式 (9) の左辺の変数も区別する必要がないため、単純に $[x_\alpha, y_\alpha]^T = [x_\alpha^B, y_\alpha^B]^T$ と表現することにする。

4.3 部分境界散乱変換の逆変換

前節では実空間及びデータ空間から部分変換空間への変換が矛盾なく一意に定義できることを示した。しかし、部分変換空間から実空間への変換の存在は示していない。この変換は部分境界散乱変換の逆変換を意味する。本節ではこの変換について調べる。

式 (7) は次式の通り書き換えることができる。

$$x_\alpha = x + (\sqrt{\alpha}y) \frac{d(\sqrt{\alpha}y)}{dx} \quad (16)$$

$$\sqrt{\alpha}y_\alpha = \sqrt{\alpha}y \sqrt{1 + \left(\frac{d(\sqrt{\alpha}y)}{dx} \right)^2} \quad (17)$$

$0 \leq \alpha$ であるため、各変数は実数となる。この式は従来の境界散乱変換の変数を $y \rightarrow \sqrt{\alpha}y$ 及び $y_\alpha \rightarrow \sqrt{\alpha}y_\alpha$ と書き換えたものとなっている。このことから直ちに逆変換が導ける。なぜなら逆境界散乱変換の各変数を同様に変数変換することで式 (17) の逆変換となるためである。逆変換は次式で表される。

$$x = x_\alpha - \alpha y_\alpha \frac{dy_\alpha}{dx_\alpha} \quad (18)$$

$$y = y_\alpha \sqrt{1 - \alpha \left(\frac{dy_\alpha}{dx_\alpha} \right)^2} \quad (19)$$

この変換は部分逆境界散乱変換 FIBST(α) に他ならない。同様にして、部分逆境界散乱変換の逆変換は部分境界散乱変換になることが示される。この特徴を用いることで、疑似波面を部分逆境界散乱変換により部分変換疑似波面に移した後に、再び部分逆境界散乱変換により推定像を得ることも可能であることがわかる。

以上では $0 \leq \alpha \leq 1$ に対して部分境界散乱変換 FIBST(α) 及び部分逆境界散乱変換 FIBST(α) を定義し、これらの性質を調べてきた。これは従来どおり順変換と逆変換を区別して示すことで説明上の混乱を防ぐためであった。しかし、変換される変数を考慮せずに変換式のみを見れば $-1 \leq \alpha \leq 1$ に対して FIBST(α) = FIBST($-\alpha$) が成り立つことがわかる。例えば $\alpha = -1$ のとき、部分境界散乱変換 FIBST(α) は逆境界散乱変換を、部分逆境界散乱変換 FIBST(α) は境界散乱変換を表すことになる。 $-1 \leq \alpha \leq 1$ とすることで順変換と逆変換を同時に扱うことが可能となる。以下では部分境界散乱変換を一般化して $-1 \leq \alpha \leq 1$ に対して式 (7) を定義し、部分逆境界散乱変換は扱わない。また、複数回の変換については変換どうしを足し合わせる表現を採用する。この表現を用いると境界散乱変換や逆境界散乱変換を 2 回に分けて扱うことが次式の通り記述できる。

$$\text{FIBST}(1) = \text{FIBST}(\alpha) + \text{FIBST}(1 - \alpha) \quad (20)$$

$$\text{FIBST}(-1) = \text{FIBST}(-\alpha) + \text{FIBST}(-1 + \alpha) \quad (21)$$

この表現において、部分境界散乱変換はパラメータ α に対して線形性を有することがわかる。従来我々が提案してきた SEABED 法において、境界散乱変換に逆変換が存在するということは

$$\text{FIBST}(0) = \text{FIBST}(1) + \text{FIBST}(-1) \quad (22)$$

と表すことができる。ここで FIBST(0) は恒等変換を表す。前述の線形性より $1 + (-1) = 0$ が逆変換の本質であることがわかる。図 3 に部分境界散乱変換と従来の境界散乱変換及び逆境界散乱変換の関係を示す。

4.4 部分変換疑似波面の特徴

前章で述べた通り、疑似波面の 2 階導関数は凸物体に対して

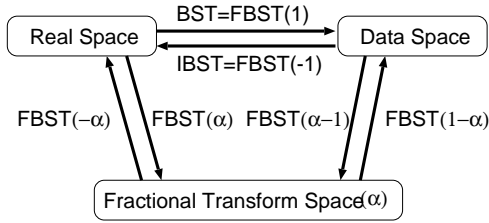


図3 実空間，データ空間，及び部分変換空間の関係
Fig. 3 The relationships of the spaces.

は滑らかになるために平滑化が容易である一方，凹面に対しては推定像の精度を悪化させる原因となる．一方，部分変換疑似波面の2階導関数は次式で表される．

$$\frac{d^2 y_\alpha}{dx_\alpha^2} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\{1 + \alpha \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\}^{3/2} \{1 + \alpha \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 + \alpha y \frac{d^2 y}{dx^2}\}} \quad (23)$$

この式で $\alpha = 0$ の場合には分子のみが残り，目標形状自体の2階導関数と一致する．また， $\alpha = 1$ の場合には前章で述べた疑似波面の2階導関数と一致する．凹面に対して疑似波面が滑らかにならない理由は分母の $1 + \alpha \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 + \alpha y \frac{d^2 y}{dx^2}$ が原因であった．凹面の場合には $\frac{d^2 y}{dx^2} < 0$ となるため，前半の正の部分 $1 + \alpha \left(\frac{dy}{dx}\right)^2$ を打ち消して非正則となる場合があり，問題であった．非正則とならないための $\frac{d^2 y}{dx^2}$ の条件は次式で与えられる．

$$\frac{d^2 y}{dx^2} > -\frac{1}{\alpha y} - \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 / y \quad (24)$$

$\alpha = 1$ の場合よりも $\alpha < 1$ とすることで正則となる条件が緩和されることがわかる．一方， $\alpha \approx 0$ とすると分子 $\frac{d^2 y}{dx^2}$ が大きい場合に $\frac{d^2 y_\alpha}{dx_\alpha^2}$ も大きくなる問題がある．そこで両者の妥協を取り， $\alpha = 0.5$ における平滑化を提案する．図4に目標物体の2階導関数 $d^2 y/dx^2$ と部分変換疑似波面の2階導関数の絶対値 $|d^2 y_\alpha/dx_\alpha^2|$ の関係の例を示す．但し， $y = 1$ ， $dy/dx = 0$ 及び $d^2 y/dx^2 = 1$ と仮定した場合の数値例である．部分変換疑似波面は $\alpha = 0$ とすることで目標形状自体の2階導関数， $\alpha = 0.5$ とする場合の部分変換疑似波面， $\alpha = 1$ となる従来の疑似波面を表す． $d^2 y/dx^2 > 0$ の場合には目標形状が最も大きな2階導関数を持つ．また， $d^2 y/dx^2 < 0$ の場合には疑似波面が最も大きな2階導関数を持つ．一方，部分変換疑似波面 ($\alpha = 0.5$) はいずれの場合でも2階導関数の最大値を取らないことがわかる．このように，部分変換疑似波面を用いることで目標形状の凹凸に依存せずに2階導関数を小さくし，長い相関長での平滑化が可能となる．図5に，提案する平滑化手法を従来手法[14]と比較して示す．従来手法では疑似波面を平滑化した後，一度に逆境界散乱変換を適用して推定形状を得るのに対し，提案手法では疑似波面を部分境界散乱変換 ($\alpha = -0.5$) によって部分変換疑似波面とし，平滑化を行った後に再び部分境界散乱変換 ($\alpha = -0.5$) によって推定形状を得る．この処理は部分逆境界散乱変換が従来の境界散乱変換と同様に高速に計算されることから，従来手法の有する高速処理の利点を損なうことがない．

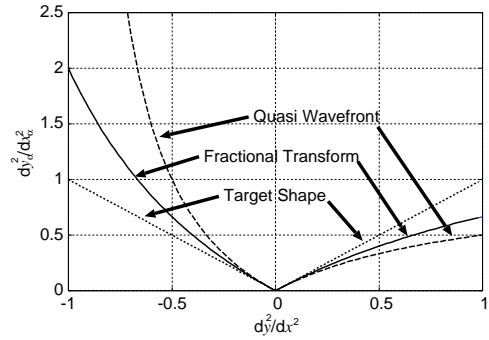


図4 $d^2 y/dx^2$ と $d^2 y_\alpha/dx_\alpha^2$ の関係
Fig. 4 The relationship between $d^2 y/dx^2$ and $d^2 y_\alpha/dx_\alpha^2$.

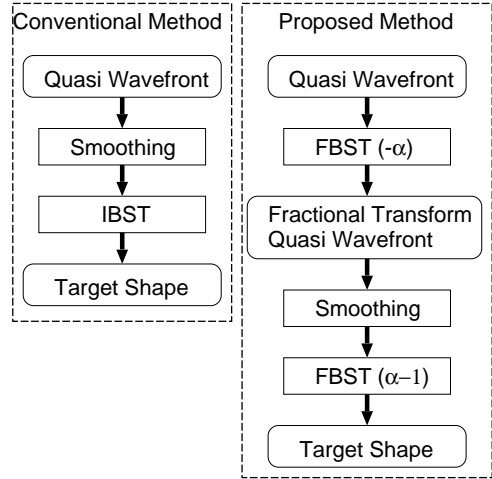


図5 提案平滑化手法及び従来法の処理手順

Fig. 5 The procedures of the proposed smoothing method and the conventional one.

5. 部分境界散乱変換を用いた推定像安定化手法の適用例

本節では従来手法と提案手法の双方により推定される形状の精度について適用例を元に示す．ここでは形状推定後に平滑化を行う手法についても比較対象として検討する．本節では図6に実線で示す目標形状を仮定する．目標は凸面の部分と凹面の部分の両方を有するものとしている．疑似波面はこの目標形状に対して境界散乱変換を適用することで計算する．雑音は実際には受信信号に加算されるが，簡単のため推定されるレンジに正規分布に従う誤差を加えることで近似する．疑似波面に加える誤差の標準偏差は 1.0×10^{-2} 波長とする．疑似波面はあらかじめ歪みを生じない程度 (2.5×10^{-2} 波長) の相関長で平滑化を行ったものを用いる．図6の破線はレーダにより得られる疑似波面を示す．目標形状の凸面は疑似波面では滑らかになっており，逆に目標形状の凹面は疑似波面では鋭くなっていることがわかる．一方，同図に示す部分変換疑似波面は凸面及び凹面の双方で両者の中間的な曲率を有することが確認できる．

各手法の平滑化の相関長は0.1波長とする．また，図7に各手法で推定した形状と真値との誤差を示す．凸部分aについては実空間での平滑化を行う場合に最も大きな誤差を生じ，凹部

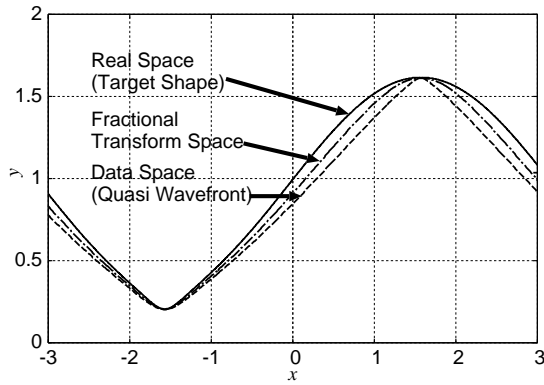


図 6 部分境界散乱変換の例
Fig. 6 An example of a fractional BST.

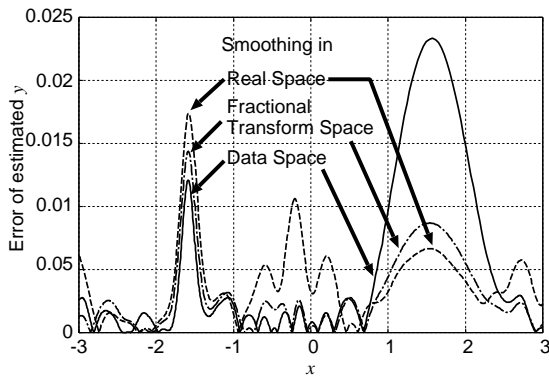


図 7 各平滑化手法での推定形状の誤差
Fig. 7 The error of estimated shape.

分 b については疑似波面の平滑化を行う場合に最も大きな誤差を生じている。一方、部分変換疑似波面の平滑化を行う提案手法では凹凸の双方の部分で誤差が小さくなっており、形状に依存せずに推定形状の安定化が実現されていることがわかる。

6. まとめ

本論文では UWB パルスレーダのための高速形状推定法である SEABED 法の推定像安定化手法を提案し、適用例を示すことでその有効性を明らかにした。SEABED 法のための推定像安定化手法としては凸物体のみに適用可能な手法が提案されていた。提案手法は目標形状に依存せずに安定な形状推定を実現するものである。まず、SEABED 法で使用する境界散乱変換を拡張した部分境界散乱変換を提案した。部分境界散乱変換により、目標形状と受信信号の等位相面である疑似波面との空間である部分変換空間を扱うことが可能となる。目標形状や疑似波面で大きな曲率を有する場合でも部分変換空間では滑らかな曲線でデータを表現することが可能である。このため、部分境界散乱変換を用いる平滑化手法により形状に依存せずに歪みを小さく抑え、安定化を実現できる。適用例では提案手法を用いることで目標形状の凹凸に依存せずに推定誤差を小さくすることが示された。

文 献

[1] E. J. Bond, X. Li, S. C. Hagness, and B. D. van Veen, "Microwave imaging via space-time beamforming for early de-

tection of breast cancer," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 8, pp. 1690–1705, 2003.

[2] 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.

[3] 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.

[4] C. J. Leuschen and R. G. Plumb, "A matched-filter-based reverse-time migration algorithm for ground-penetrating radar data," *IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing*, vol. 39, no. 5, pp. 929–936, May 2001.

[5] T. J. Cui, Y. Qin, G. L. Wang, and W. C. Chew, "High-order inversion formulas for low-frequency imaging of 2D buried targets," *Proceedings of 2004 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1, pp. 189–192, 2004.

[6] 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.

[7] 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," *International Journal of Imaging Systems and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 337–342, Dec. 1998.

[8] 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 Sensing*, vol. 38, no. 1, pp. 296–303, 2000.

[9] 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.

[10] T. Sakamoto and T. Sato, "Fast imaging of a target in inhomogeneous media for pulse radar systems," *Proc. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Vol. 3*, pp. 2070–2073, Sep. 2004.

[11] T. Sakamoto and T. Sato, "A phase compensation algorithm for high-resolution pulse radar systems," *IEICE Trans. Communications*, vol. E87-B, no. 11, pp. 3314–3321, Nov., 2004.

[12] T. Sakamoto and T. Sato, "A phase compensation algorithm for high-resolution pulse radar systems," *Proc. 2004 International Symposium on Antennas and Propagation*, pp. 585–588, Aug. 2004.

[13] 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.

[14] 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*, July, 2005.