

UWBパルスレーダによる 高速立体形状推定法のためのエッジ保存型安定化手法

阪本 卓也[†] 木寺 正平[†] 佐藤 亨[†] 杉野 聡^{††}

[†] 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

^{††} 松下電工株式会社 先行・融合技術研究所 高度 MEMS 開発センター,
〒571-8686 大阪府 門真市 大字門真 1048

あらまし 超広帯域 (UWB) 信号を利用した UWB パルスレーダはロボット用状況測定手段の有望な候補である。レーダ画像化は設定不適切逆問題の一種であり、従来は計算時間の問題により実時間処理が困難であった。我々が開発してきた立体形状推定法 SEABED 法は従来にない高速処理を実現するものであるが、雑音耐性の問題があった。本稿では SEABED 法の高分解能を保ちつつ雑音耐性を向上させる手法を提案し、実験データに対する SEABED 法の特性を検討する。

キーワード UWB パルスレーダ実験, 立体形状推定, SEABED 法, 安定化

An Edge-Preserving Stabilization for a Fast 3-D Imaging Algorithm with a UWB Pulse Radar

Takuya SAKAMOTO[†], Shouhei KIDERA[†], Toru SATO[†], and Satoshi SUGINO^{††}

[†] Department of Communications and Computer Engineering,
Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

^{††} Advanced MEMS Development Center, Matsushita Electric Works, Ltd.,
1048, Kadoma, Osaka 571-8686, Japan

Abstract UWB (Ultra Wide Band) pulse radars are promising candidates for the environment measurement for robots. Conventional algorithms for radar imaging have a too long calculation time to apply to the realtime operation of robots. We have developed a fast imaging algorithm SEABED, which is based on a reversible transform. The performance of the SEABED algorithm has been studied only with numerical simulations. In this paper, we experimentally study the performance of the algorithm with a UWB pulse radar experiment system. Additionally, we expand the SEABED algorithm to enhance the robustness against the noisy experimental data.

Key words UWB pulse radar experiment, 3-D shape estimation, SEABED method, stabilization

1. ま え が き

UWB (Ultra Wide Band) パルスレーダによる画像化は、災害救助ロボットの状況測定などの多くの応用が期待される重要な技術である。一般に、近傍の目標をレーダで画像化する問題は設定不適切逆問題の一種として知られており [1], 多くの手法が提案されてきた [2] ~ [6]。これら従来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であり、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逆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瞭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。このようにモデルを簡単化することにより、我々は高速形状推定法である SEABED 法を開発した [7] ~ [10]。SEABED 法は目標が明瞭な境界を有することを仮定することで、目標形状と受信データの間になり立つ可逆な変換関係を利用して高速形状推定を実現する。これまで、数値計算によって SEABED 法が立体目標形状を高速に推定可能であることが明らかになっているものの、実験データに対して同手法を適用した場合の特性は報告されていない。本論文で

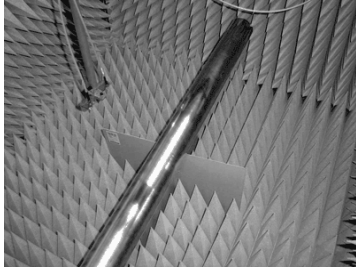


図1 UWB パルスレーダ実験システム

Fig.1 Experiment site for a UWB pulse radar.

は SEABED 法を実験データに適用し、実環境下での立体形状推定の特性を調べる。また、適応的平滑化により雑音環境下での SEABED 法を安定化させる手法を提案し、同手法により実験データに対しても分解能を犠牲にせずにロバスト性を改善できることを示す。

2. システムモデルおよび実験システム

空気中の明瞭な境界に囲まれた目標物体の形状を推定する問題を扱う。UWB パルスの送信および受信を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。偏波は直線偏波とする。この送受信アンテナを平面走査しながら UWB パルスの送受信を行なう。受信信号は A/D 変換され、メモリに記録される。

以上で説明したシステムモデルに基づいて実験システムを構成する。使用する UWB パルスレーダの実験サイトを図 1 に示す。UWB パルス発生器の出力信号をケーブルを通して送信アンテナに入力する。数値計算では送受信兼用の単一アンテナを想定するが、実験では送信アンテナと受信アンテナを近接させて近似的にモノスタティックシステムを構成する。両アンテナ間の距離は 6.5cm であり、いずれも無指向性アンテナである。送受信アンテナ対を X-Y ポジションに取り付け、平面上を走査する。送受信アンテナを自由空間中对向させて目標までの距離の 2 倍程度離れた場合の受信波形を参照波形とし、以下簡単のため送信波形と呼ぶ。送信波形はあらかじめ測定しておき、この波形に整合するフィルタを受信信号に適用する。受信アンテナで受信される信号はオシロスコープでデジタルデータに変換され、保存される。送信信号は中心周波数 3.3GHz (中心波長 $\lambda = 9.1\text{cm}$)、10dB 帯域幅 2.0GHz である。これは比帯域 61% に相当し、FCC による UWB 信号の帯域に関する条件 (10dB 帯域幅 500MHz 以上または比帯域 20% 以上) を満たす。図 2 に送信信号の周波数スペクトルを示す。偏波は長軸対短軸の電力比が送受信合計で 17.0dB の楕円偏波である。また、パルス繰り返し周期 (IPP) は 10nsec である。X-Y ポジションについては $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ の正方形の範囲を 0.125λ (1.1cm) 間隔で 41×41 点 (1681 点) にわたりアンテナの走査を行う。

3. SEABED 法

本節では高速立体目標形状推定手法である SEABED 法 [7] を簡単に説明する。 xyz 直交座標系の $x-y$ 平面 ($z = 0$) をアンテナ走査面とし、アンテナ位置 $(x, y, z) = (X, Y, 0)$ で受信された

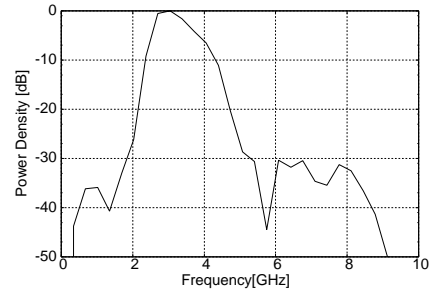


図2 送信信号の周波数スペクトル

Fig.2 Power spectrum of the transmitted signal.

信号を $s_0(X, Y, Z)$ と定義する。ここで Z は受信時刻 t および中心周波数 f_0 を用いて $Z = f_0 t / 2$ と定める。 x, y, z, X, Y, Z のいずれもパルスの中心波長で正規化する。ただし、簡単のため $z > 0$ とする。受信信号に整合フィルタを適用し、 $s(X, Y, Z)$ を得る。 $s(X, Y, Z)$ の等位相面を疑似波面と呼び、距離方向の偏微分 $\partial s(X, Y, Z) / \partial Z = 0$ となる (X, Y, Z) を順次接続することにより得られる。目標境界 (x, y, z) と疑似波面 (X, Y, Z) の間には次式の境界散乱変換 (BST; Boundary Scattering Transform) が成り立つ。

$$X = x + z z_x \quad (1)$$

$$Y = y + z z_y \quad (2)$$

$$Z = z \sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2} \quad (3)$$

ただし $z_x = \partial z / \partial x$ とし、他も同様とする。この式は目標境界面上の点 (x, y, z) において強い散乱の起こるアンテナ位置 $(X, Y, 0)$ および散乱点までの距離 Z を表したものである。

境界散乱変換の逆変換である逆境界散乱変換 (IBST; Inverse BST) は次式で表される。

$$x = X - Z Z_X \quad (4)$$

$$y = Y - Z Z_Y \quad (5)$$

$$z = Z \sqrt{1 - Z_X^2 - Z_Y^2} \quad (6)$$

この逆境界散乱変換を使用すると目標形状 (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。しかし、逆境界散乱変換の右辺には疑似波面の微分が含まれているため、疑似波面に含まれる不規則成分が強調され、推定像が劣化する [10]。こうした像の劣化を避けるためには平滑化が必要となるが、平滑化処理は推定像の分解能を低下させる原因となる。SEABED 法の特徴である高分解能を保ちつつ不規則成分を低減させるためには疑似波面の有する性質を考慮した適切な平滑化が必要となる。疑似波面の性質と平滑化処理について次節で詳しく調べる。

4. 疑似波面の性質を利用した平滑化手法

4.1 疑似波面のヘッセ行列の上限

雑音などの不規則成分により SEABED 法の推定像が劣化する問題を解決するには平滑化が有効である。一般に、定常信号に対する平滑化は整合フィルタに対応する応答波形を畳み込む

平滑化が最適である．しかし，目標形状は平面，曲面やエッジなどを含む強い非定常性を有し，平滑化は容易ではない．一方，本節で示すとおり，凸形状目標物体の疑似波面は目標形状に比べて滑らかさが保証されているため，実空間ではなくデータ空間の疑似波面の段階での平滑化が分解能と安定性を両立する上で適切である．しかしながら，疑似波面もまた非定常信号であるため，滑らかさに応じて平滑化に用いる関数を変化させることが有効である．以下では，滑らかさの指標としてヘッセ行列に着目し，凸物体に対応する疑似波面のヘッセ行列 H_z の特徴を議論する．さらに，疑似波面の性質に基づいた適切な平滑化手法を解析的に導出する．

まず，凸関数のヘッセ行列の有する性質を述べる．凸物体 $z(x, y)$ のヘッセ行列

$$H_z = \begin{bmatrix} z_{xx} & z_{xy} \\ z_{yx} & z_{yy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

は正定値行列となるため，次の不等式が成り立つ．

$$\text{tr}H_z = z_{xx} + z_{yy} > 0 \quad (8)$$

$$\det H_z = z_{xx}z_{yy} - z_{xy}^2 > 0 \quad (9)$$

次に，凸物体の散乱中心を特徴づける不等式 $x_X > 0$ が成り立つことを示す．この不等式の意味は，アンテナが移動するときに受信されるエコーの散乱中心がほぼ同方向に移動するということである．この性質は疑似波面のヘッセ行列を調べる上で重要な性質である．式 (4) を x について解くことで次式を得る．

$$x = X - zz_x \quad (10)$$

Y を固定して両辺を X で偏微分することで次式を得る．

$$x_X = 1 - (z_x^2 + zz_{xx})x_X - (z_x z_y + zz_{xy})y_X \quad (11)$$

x_X について解くことで次式を得る．

$$x_X = \frac{1 - (z_x z_y + zz_{xy})y_X}{1 + z_x^2 + zz_{xx}} \quad (12)$$

同様にして y_X も次式のとおり求められる．

$$y_X = -\frac{(z_x z_y + zz_{xy})x_X}{1 + z_y^2 + zz_{yy}} \quad (13)$$

式 (12) および (13) から x_X は次式で表される．

$$x_X = \frac{1}{d_1 + d_2 + d_3 + d_4} \quad (14)$$

$$d_1 = 1 + z_x^2 + z_y^2 \quad (15)$$

$$d_2 = z(z_{xx} + z_{yy}) = z \text{tr}H_z \quad (16)$$

$$d_3 = z^2(z_{xx}z_{yy} - z_{xy}^2) = z^2 \det H_z \quad (17)$$

$$d_4 = z(z_x^2 z_{yy} + z_y^2 z_{xx} - 2z_x z_y z_{xy}) \quad (18)$$

ここで $z > 0$ および式 (8) (9) により， $d_1 > 0$ ， $d_2 > 0$ および $d_3 > 0$ が成り立つ． d_4 については次のとおりである． $d_4 = 0$ を z_x の 2 次方程式と考える場合の判別式は $D = -4z^2 z_y^2 \text{tr}H_z \leq 0$ であり， z_x^2 の係数について $z^2 z_{yy}^2 > 0$ が成り立つ．したがっ

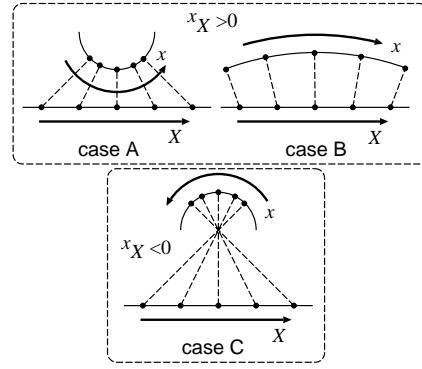


図 3 2次元の場合の目標形状と x_X の正負

Fig. 3 The relationship between the target shape and the sign of x_X for the 2-D case.

て， d_4 は変数軸と高々一つの交点を有する下に凸の放物線であるため $d_4 \geq 0$ が成り立つ．以上の d_1 ， d_2 ， d_3 および d_4 についての条件を考慮すると式 (14) より

$$x_X > 0 \quad (19)$$

が成り立つことがわかる．目標形状と x_X の正負の関係について，簡単のために 2次元の場合について図 3 に示す．同図において上段の A および B の場合についてはアンテナ位置 X と散乱中心 x が同方向に移動していることがわかる．一方，C の場合にはそれらが逆方向に移動している．本論文で扱う凸物体は A の場合に相当する．ただし，3次元の場合には散乱中心位置が y 方向の形状にも依存するため，図 3 のように単純ではない．しかし，3次元の場合でも同様の性質が成り立つことが式 (19) において解析的に示されている．

点状目標やエッジに対しては式 (14) の分母の 4 項はいずれも $+\infty$ へ発散し， $x_X = 0$ と等号が成り立つ．これは点状目標やエッジからのエコーは鏡面反射ではなく回折波に対応するため，同一散乱点からの散乱波がアンテナ位置に依存せずに受信されることを意味する．一方，滑らかな面での鏡面反射に対しては常に $x_X > 0$ が成り立つ．以下で示す不等式は等号を含んでいないが，凸形状物体の定義を点やエッジにまで拡張すれば等号が成立し，等号成立条件は点目標やエッジに対応する．ここで点やエッジを含めて議論しないのは目標の勾配やヘッセ行列が発散し，扱いにくいためである．

以上で示した式 (19) を利用し，凸物体の疑似波面のヘッセ行列 H_z の固有値の上限について調べる．固有値の上限がわかると，受信データから求まる疑似波面の滑らかさを見積もることができ，平滑化の相関長を適切に選択することが可能となる．式 (4) を Z_X について解くことで次式を得る．

$$Z_X = (X - x)/Z \quad (20)$$

式 (20) の両辺を X で微分することで次式を得る．

$$Z_{XX} = \frac{(1 - x_X)Z - (X - x)Z_X}{Z^2} \quad (21)$$

式 (20) を式 (21) に代入することで次式を得る．

$$Z_{XX} = \frac{1 - Z_X^2 - x_X}{Z} \quad (22)$$

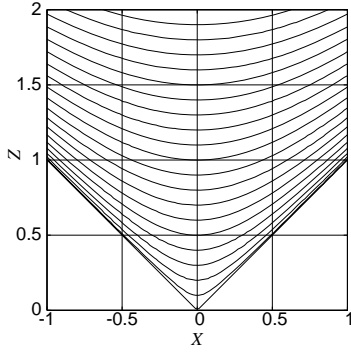


図 4 点目標に対応する疑似波面

Fig. 4 Quasi wavefronts of the echoes from point targets.

ここで、式 (19) のとおり $x_X > 0$ が成り立つため、次の不等式を得る。

$$Z_{XX} < \frac{1 - Z_X^2}{Z} \quad (23)$$

この式は、疑似波面のヘッセ行列の対角項に上限が存在し、その上限が疑似波面とその偏微分により決まることを意味する。

曲面の滑らかさはヘッセ行列の固有値によって決まる。特に、平滑化による歪みを抑えるには、最大固有値を知る必要がある。式 (23) はヘッセ行列の対角項の 1 つであり、 X が着目する点 (X, Y) でのヘッセ行列の最大固有値に対応する固有ベクトルと平行であれば、同式の右辺は最大固有値の上限となる。ゆえに、ヘッセ行列 H_Z の最大固有値 e に対して次式が成り立つ。

$$e < \frac{1 - Z_V^2}{Z} \quad (24)$$

ただし、 Z_V は最大固有値に対応する固有ベクトル方向の偏微分を表す。さらに、 $Z_V^2 \geq 0$ であるので、次式が成り立つ。

$$e < \frac{1}{Z} \quad (25)$$

この式は疑似波面の滑らかさの上限がエコーの受信時間のみに依存することを意味する。遠方の目標からの散乱信号に対しては、必ず滑らかな疑似波面が得られる。前述のとおり、式 (25) の不等号は目標が点やエッジの場合に等号となる。 z 軸上に存在する点目標に対応する疑似波面は、走査面からの距離 Z_0 に対して回転双曲面 $Z = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z_0^2}$ と表され、その X - Z 平面での断面は図 4 に示すとおりである。ただし、同図には Z_0 を変化させた複数の場合に対応する断面が描かれており、 Z_0 の値は Z 軸との切片と等しい。同図より距離 Z が大きくなるに従って曲率の上限が小さくなる式 (25) の関係が確認できる。特に、点目標が近くにある場合には $X = 0$ 付近で極めて大きな曲率を有しており、平滑化が困難である。

4.2 提案平滑化手法

本節では、前節の考察に基づいて非定常信号である疑似波面に対する適切な適応平滑化法を提案する。本論文では次式のガウス関数との畳み込みによる平滑化を検討対象とする。

$$g(X, Y; \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{X^2 + Y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (26)$$

ガウス関数のパラメータは相関長 σ のみを考慮し、疑似波面の

滑らかさに応じて σ を変化させる。例えば、疑似波面のヘッセ行列の固有値が小さい場合には、疑似波面は平面に近く、長い相関長を用いた平滑化が可能である。逆に、固有値が大きい場合には、推定像の分解能劣化を避けるために相関長を短くする必要がある。仮に疑似波面のヘッセ行列 H_Z が既知であれば、固有ベクトルによりガウス関数のパラメータを決めることができる。しかし、疑似波面のヘッセ行列を求めるには 2 階微分が必要であり、数値的に不安定となる。そこで、疑似波面のヘッセ行列を用いずに前節の式 (25) を代わりに用いる。式 (25) の右辺は疑似波面の曲率を大きく見積もっているため、同式を用いることで相関長は安全側に設定される。したがって、疑似波面の歪みおよび推定像の分解能低下を生じる危険がない。相関長の決め方は次の通りである。ガウス関数を用いた平滑化により生じる疑似波面 $Z(X, Y)$ の歪み δ を次式で定義する。

$$\delta = \left| \int \int_{-\infty}^{\infty} g(X, Y; \sigma) Z(X, Y) dXdY - Z(0, 0) \right| \quad (27)$$

疑似波面を点 $(X, Y) = (0, 0)$ において局所的に二次曲面 $Z(X, Y) = a(X^2 + Y^2)/2 + bX + cY + d$ で置き換える。このとき、点 $(X, Y) = (0, 0)$ におけるヘッセ行列の固有方程式は重解を持ち、最大固有値は $e = a$ となる。一般的には疑似波面のヘッセ行列の固有方程式は重解を持たないものの、前節の方法により求められる最大固有値の上限を a に設定することで、この二次曲面により歪みの最悪値を見積もることができる。歪み許容値 δ_{\max} に対する相関長 σ の最大値は、式 (27) より $\sigma \leq \sqrt{\delta_{\max}/\pi a}$ と定まる。式 (25) に基づく条件 $a = e < 1/Z$ を考慮し、

$$\sigma = \sqrt{\delta_{\max} Z / \pi} \quad (28)$$

を得る。本論文では式 (28) の右辺を相関長としたガウス関数により疑似波面の平滑化を行う。

5. 実験による提案手法の性能評価

本節では、実験により得られたデータに対して SEABED 法を適用し、形状推定性能を調べる。その際に平滑化を使用しない場合、実空間での平滑化を行う場合、およびデータ空間での提案平滑化を行う場合の 3 通りについて推定形状の精度や安定性について検討を行う。

本節で形状推定の対象とする目標物体は図 5 に示す円錐形の導体物体とする。ただし、送信パルスの中心波長 9.1cm に対し、底面の半径を 1.64λ (14.9cm)、高さを 1.1λ (9.8cm)、走査面から頂点までの距離は 0.93λ (8.5cm) とし、底面とアンテナ走査面は平行とする。適用例として円錐形状を採用するのは、円錐は滑らかな面とエッジ点の両方が存在し、平滑化による推定像の安定化が困難であるためである。アンテナ走査は円錐物体の頂点位置を中心とする範囲とする。数値計算では目標物体は完全導体とし、実験では厚さ 0.1mm のアルミニウム製の中空の円錐形状物体を使用する。実験で使用する目標物体を図 6 に示す。

まず、真の疑似波面に対して SEABED 法を適用する場合の

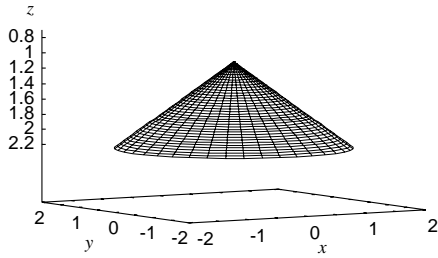


図 5 実験で仮定する真の目標形状
Fig. 5 True target shape.

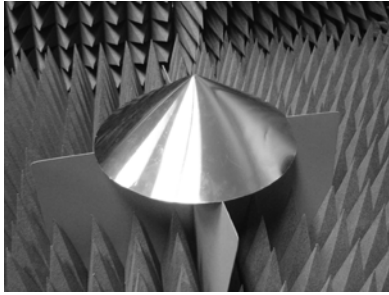


図 6 実験で使用する円錐形状目標
Fig. 6 Conical metallic object used for the experiment.

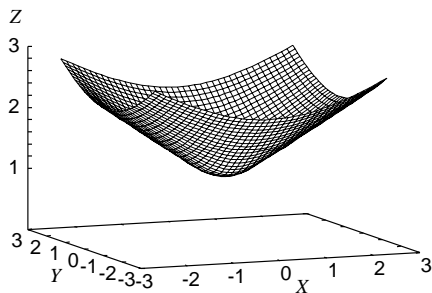


図 7 真の疑似波面
Fig. 7 True quasi wavefront.

特性を調べる．実験で使用する目標形状に対応する疑似波面を図 7 に示す．実験においてはアンテナ位置が中央部分にある場合にはエッジ回折波が，周辺部では鏡面反射波がそれぞれ受信される．同図の疑似波面の形状はこれらに対応し，中央部では回転双曲面の一部，周辺部では円錐の一部となっており，これらが滑らかに接続されている．SEABED 法では図 7 の疑似波面に対して逆境界散乱変換を適用することで目標形状を推定する．図 8 に数値計算データを用いた SEABED 法による推定形状を示す．同図では雑音の無い信号を仮定しているため，円錐先端部のエッジも含めて真の形状が正しく推定されているのが確認できる．このように SEABED 法は雑音の無い場合には極めて高精度な形状推定を実現することが可能である．

次に SEABED 法の実験データに対する特性を調べる．送信パルスやアンテナ走査方法はシステムモデルに記述した通りである．また，送受信アンテナの主偏波方向および送受信アンテナのベースラインはいずれも y 方向に設定する．実験データから推定される疑似波面を図 9 に示す．同図より，疑似波面の周辺部に対して中央部では大きな不規則成分が確認できる．これ

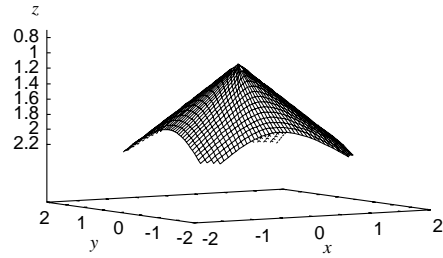


図 8 真の疑似波面を用いた SEABED 法による推定目標形状（雑音無し）
Fig. 8 Estimated target shape of SEABED algorithm with the true quasi wavefront.

は，周辺部では鏡面反射による強い散乱波が，中央部ではエッジ回折波による弱い散乱波がそれぞれ受信されているため，中央部よりも周辺部の方が S/N が大きくなっているためである．同図の疑似波面に対し逆境界散乱変換を適用することで推定される目標形状を図 10 に示す．ただし，送受信アンテナ間の距離を補正する修正法 [11] を使用している．一般に実験データから得られる疑似波面は雑音やタイミングジッタの残留成分の影響により不規則な成分を有する．逆境界散乱変換は疑似波面の微係数を必要とするため，SEABED 法を直接適用する場合には不規則成分の影響により像が劣化する．図 10 の推定像をガウス関数で平滑化することで得られる推定形状を図 11 に示す．ただし，平滑化の相関長は 0.1λ としている．同図では円錐形状の側面に対応する部分に不規則成分の影響による凹凸が見られる．一方で先端部のエッジは歪んで滑らかになっており，分解能と雑音耐性のいずれも十分なものではない．

不規則成分による推定形状劣化の理由は次の 2 つである．1 つ目は，物体形状には制約条件がなく曲率の局所性が大きいために，一定の相関長による平滑化では推定像を安定化させつつ分解能を保つことが難しいということである．2 つ目は，逆境界散乱変換の微分操作は不規則成分を強調する効果があるため，変換前に平滑化が必要があるということである．当然ながら逆境界散乱変換は非線型変換であるため，平滑化と変換の順序は推定像に影響を与える．

式 (28) で定まる相関長 σ を用いる疑似波面平滑化による提案法を実験データに適用する．提案手法により得られる推定形状を図 12 に示す．ただし，歪み許容値は経験的に $\delta_{\max} = 0.12\lambda$ とした．側面では不規則成分が抑圧され，滑らかな形状が推定されており，先端のエッジ部分もほとんど歪まずに正しく推定されている．提案手法により，雑音耐性と高分解能が両立される安定した形状推定が実現されることが確認される．

6. ま と め

本稿では UWB パルスレーダを用いた空気中での目標形状推定手法を扱った．UWB パルスレーダによる高精度な立体形状推定を実現するために我々が開発してきた SEABED 法を実験データに適用し，その特性を明らかにした．SEABED 法は目標物体が明瞭な境界を有するという条件下で目標境界と受信データの間に変換関係が成り立つことを利用して高速

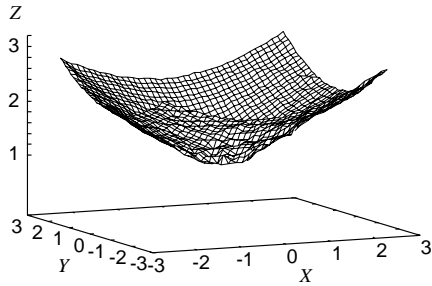


図9 実験データより抽出される疑似波面

Fig. 9 Quasi wavefront extracted from the experimental data.

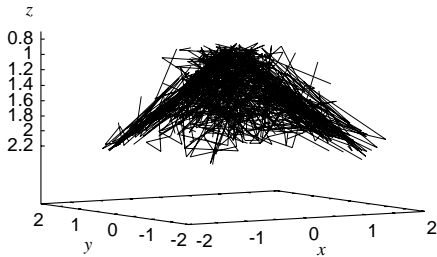


図10 実験データを用いた SEABED 法による推定像 (平滑化無し)

Fig. 10 Estimated target shape of SEABED algorithm without smoothing.

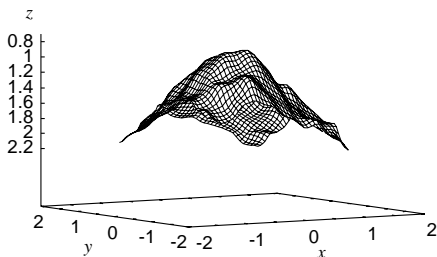


図11 実験データを用いた実空間平滑化による推定像

Fig. 11 Estimated target shape of SEABED algorithm with a smoothing in the real space.

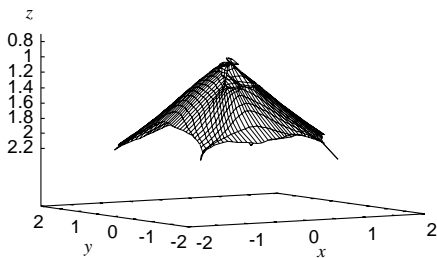


図12 実験データを用いた提案平滑化手法による推定像

Fig. 12 Estimated target shape of SEABED algorithm with the proposed smoothing in the data space.

な形状推定を実現することを現在までに数値シミュレーションにより確認してきた。実験データより抽出された疑似波面には雑音やタイミングジッタに基づく不規則信号が含まれており、SEABED 法を直接に適用すると推定像が不安定になることを確認した。目標物体が凸物体であれば疑似波面の2階導関数には上限があり、滑らかさが保証されるために平滑化が有効であ

ることを示した。この2階導関数の上限を2階導関数の代わりに使用する適応平滑化により像の安定化が達成されることを示した。

謝 辞

本研究の実験を行うにあたり貴重なご助言を賜りました産業技術総合研究所黒川悟博士に心より感謝致します。

文 献

- [1] 佐藤 亨, 阪本卓也, “UWB パルスレーダによる物体像再構成アルゴリズム,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J88-B, no. 12, pp. 2311–2325, Dec. 2005.
- [2] 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 Propagat., vol. 51, no. 8, pp. 1690–1705, 2003.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] S. Kidera, T. Sakamoto, and T. Sato, “A high-resolution 3-D imaging algorithm with linear array antennas for UWB pulse radar systems,” IEEE AP-S International Symposium, USNC/URSI National Radio Science Meeting, AMEREM Meeting, , July, 2006 (accepted).