

UWB パルスレーダのための高速画像化手法の実験的検討

阪本 卓也

通信情報システム専攻 佐藤研究室 博士後期課程 3 年

Tel: 075-753-3394 E-mail: t-sakamo@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp

1 はじめに

パルスレーダによる立体形状推定は災害現場用救助ロボットの周囲状況認識などの多くの応用を持つ重要な技術である。レーダによる画像化は設定不適切逆問題の一種として知られており、この問題を解くために多くのアルゴリズムが開発されてきた。しかしながら、従来法はいずれも計算時間の問題を有し、リアルタイムに動作する必要のあるロボットなどの用途に用いることは困難であった。このため、我々は超広帯域 (UWB) パルスレーダのための高速立体形状推定法である SEABED 法を提案した [1]。この手法は特定の条件下で目標形状と受信データの間に変換関係が存在することを利用したものである。同手法により高速かつ十分な精度で立体形状推定が実現されることを数値シミュレーションにより明らかにした [2]。本稿では SEABED 法を実験データに適用しその特性を確認する。更に、その際に必要な平滑化法を提案し、その適用例を示す。

2 システムモデル及び SEABED 法

空气中に明瞭な境界に囲まれた目標物体を設置し、その形状を推定する。広いビーム幅を有する送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し、この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。

xyz 座標系内の $z = 0$ 上でアンテナを走査する。アンテナ位置 $(x, y, z) = (X, Y, 0)$ で受信された信号を $s(X, Y, Z)$ と定義する。ここで $Z = ft/2$ とする。但し、 t は受信時刻、 f は中心周波数である。 x, y, z, X, Y のいずれも中心波数で正規化する。 $s(X, Y, Z)$ の等位相面を疑似波面と呼ぶ。目標境界 (x, y, z) と疑似波面 $s(X, Y, Z)$ の間には次式の逆境界散乱変換 (IBST) が成り立つ。SEABED 法は同式の右辺を計算することにより目標形状推定を実現する。

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

3 実験データへの SEABED 法の適用

実験では中心周波数 3.7GHz 及び帯域幅 1GHz の UWB パルスを送信する。本稿では目標物体は x 方向に長い直径 92mm (1.2 波長) の金属パイプの形状推定を行なう。UWB パルスレーダシステムの実験風景を図 1 に示す。使用する目標物体の真の形状を図 2 に示す。同

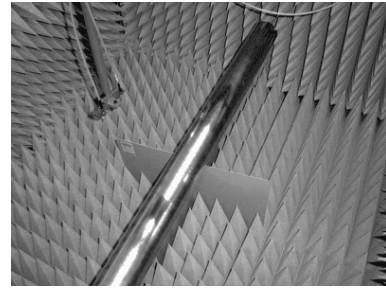


図 1 UWB パルスレーダシステム実験風景

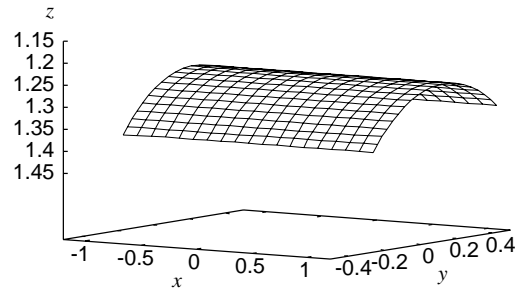


図 2 真の目標形状

図では送受信アンテナ対が下方の導体目標物体に向けてポジションに取りつけられている。実験データより抽出される疑似波面に IBST を適用することで推定される目標形状を図 3 に示す。一般に実験データから得られる疑似波面は雑音やジッタの影響により不規則な成分を有する。IBST は疑似波面の 1 階導関数を必要とするため、SEABED 法を直接適用すると不規則成分の影響により像が著しく劣化する問題がある。

4 平滑化による SEABED 法の安定化

前節で述べた通り、疑似波面の不規則成分により SEABED 法の推定形状が劣化する問題がある。この影響を抑えるために疑似波面の平滑化を行なうことが有効

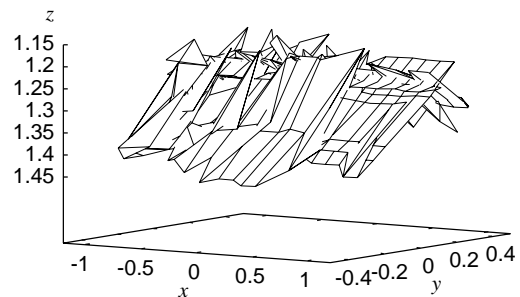


図 3 SEABED にる推定目標形状

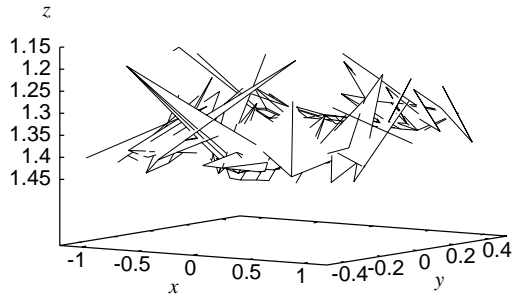


図4 2階導関数に基づく平滑化による推定像

である。なぜなら、SEABED法では目標物体のエッジ位置を推定することが可能であるため、目標物体を滑らかな複数の領域に分割し、それぞれの疑似波面に対し平滑化を行なうことで物体像の分解能をそれほど落とさずに安定化が実現されるためである。

平滑化を行う際の相関長を決定する必要がある。疑似波面の2階導関数が小さい場合は平面と見なせるため、長い相関長を利用した平滑化が可能である。ここでは2階導関数によって適応的に相関長を変化させる平滑化手法を考える。簡単のため、物体形状が x 方向に変化しない凸形状であることを前提とする。この場合、 X, Y の2変数を持つ関数 Z のヘッセ行列は対角項のみ非零の値を持つ。この項を以下では単に2階導関数と呼ぶ。まず疑似波面から2階導関数を直接求め、それに対応する相関長の平滑化を行なう方法を考える。ここでは与えられた相関長を有するガウスフィルタを用いて平滑化を行なう。相関長の決め方は次の通りである。疑似波面を局所的に2次の項の係数 a を有する2次関数で近似した場合、相関長 c は歪み許容値を δ として $c = \sqrt{12\delta/a}$ と表わされる。ここでは歪み許容値を0.03波長とする。この方法によって平滑化を行なう場合のSEABED法による推定像を図4に示す。同図のように2階導関数は不規則成分の影響を強く受けるために像の劣化は平滑化前から改善しない。

5 疑似波面の特徴を利用した適応平滑化法

本節では提案平滑化法を説明する。疑似波面の2階導関数に対し次の不等式が成り立つ。詳細は付録で述べる。

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial Y^2} < \frac{1 - (\partial Z / \partial Y)^2}{Z} \quad (2)$$

式(2)により2階導関数が疑似波面及びその1階導関数によって評価可能となる。1階導関数は雑音の影響を受けるものの2階導関数と比較すると安定に求めることができる。図4では式(2)の左辺の2階導関数を直接求めて用いていたが、提案法ではその代わりに式(2)の右辺を用いて平滑化を行なう。この方法を用いる場合、一般に2階導関数を大きく見積もることとなる。2階導関数を小さく見積もる場合は疑似波面の曲率の大きな部分の情報を見失う恐れがあるのに対し、大きく見積もる場合はその危険が少ない。提案平滑化法により得られる推定形状を図5に示す。提案法によりパイプの形状が正しく推定され、約5dBのゲインが得られる。

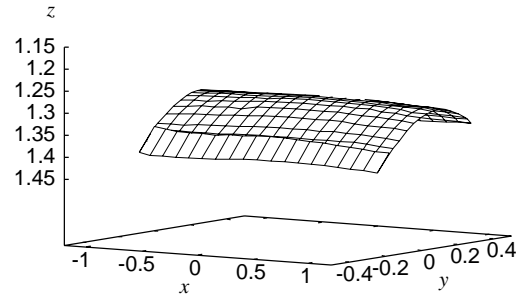


図5 提案平滑化法による推定像

6 まとめ

本稿ではUWBパルスレーダのための高速画像化手法であるSEABED法の実験データへの適用例を示した。データの不規則成分を抑圧するための平滑化法について、疑似波面の持つ特徴を利用した安定な手法を提案し、その適用例を示した。提案法はSEABED法の推定像の安定化に有効であり、目標形状が正しく推定されることを確認した。しかしながら、提案法は疑似波面のヘッセ行列の対角項のみを扱うものであるため、一般の形状に適用できない。今後は提案法を一般の形状に適用可能な手法へと拡張する必要がある。

参考文献

- [1] T. Sakamoto and T. Sato, IEICE Trans. on Commun., Vol. E87-B, No. 5, pp. 1357-1365, 2004.
- [2] T. Sakamoto and T. Sato, IEEE AP-S International Symposium, Vol. 2, pp. 2099-2102, 2004.

付録

ここで式(2)の導出を行なう。目標境界面 z 及び疑似波面 Z が $\partial z / \partial x = 0$ 及び $\partial Z / \partial X = 0$ を満たす場合、それぞれ y 及び Y のみの関数となる。この場合、疑似波面の2階微分について次式が成り立つ。但し、 Z_{YY} は Z の Y に関する2階導関数であり、他も同様である。

$$Z_{YY} = \frac{z_{yy}}{(1 + z_y^2)^{3/2}(1 + z_y^2 + z z_{yy})} \quad (3)$$

ここで目標物体が凸形状であるため $z_{yy} > 0$ 及び $z > 0$ が成り立つため $Z_{YY} > 0$ がいえる。逆に、目標境界面の2階導関数について次式が成り立つ。

$$z_{yy} = \frac{Z_{YY}}{(1 - Z_Y^2)^{3/2}(1 - Z_Y^2 - Z Z_{YY})} \quad (4)$$

ここで $Z_{YY} > 0$ 及び $z_{yy} > 0$ より次式が結論できる。

$$0 < Z_{YY} < \frac{1 - Z_Y^2}{Z} \quad (5)$$

こうして式(2)が導かれる。

謝辞

本研究に関して貴重なご助言、ご協力を賜った京都大学大学院 情報学研究科 佐藤 亨 教授、同大学院生 木寺 正平 氏、同大学生存圏研究所 三谷 友彦 先生、及び松下電工株式会社 高度MEMS開発センター 杉野 聡 氏に深謝します。