

# 再帰的適応平滑化処理を用いた 雑音耐性の高いUWBレーダ高解像度イメージング手法

High-Resolution and Robust Imaging Algorithm with Recursive Adaptive Smoothing for UWB Radars

佐保 賢志<sup>1</sup>  
Kenshi Saho

木寺 正平<sup>2</sup>  
Shouhei Kidera

阪本 卓也<sup>2</sup>  
Takuya Sakamoto

佐藤 亨<sup>2</sup>  
Toru Sato

京都大学工学部<sup>1</sup>  
Faculty of Engineering, Kyoto University

京都大学情報学研究科<sup>2</sup>  
Graduate School of Informatics, Kyoto University

## 1 はじめに

鏡面構造製品の非接触精密計測技術としてUWB(超広帯域)パルスレーダが有望である。同レーダのための高速・高精度立体像推定法としてEnvelope+SOC(Spectrum Offset Correction)法が提案されており、その有用性が確認されている[1]。しかし、同手法は30dB以上の高いS/Nの下で有効であり、反射強度が微弱な非金属製品の計測では適用困難である。そこで本稿ではデータ平滑化・信号強度を用いた同手法の雑音耐性を改善する手法を提案する。また、数値計算によりその特性評価を行う。

## 2 システムモデル

図1にシステムモデルを示す。明瞭な境界を有する凸形状目標物体を仮定する。無指向性アンテナを $z=0$ 平面内で走査する。アンテナ位置 $(x, y, z) = (X, Y, 0)$ での受信電界に整合フィルタを適用した出力を $s(X, Y, Z)$ とする。ここで各変数はそれぞれ中心波長 $\lambda$ で正規化されている。ただし、 $Z = ct/(2\lambda)$ 、 $t$ は時間、 $c$ は光速である。 $s(X, Y, Z)$ のピーク値を求め、 $(X, Y, Z)$ で構成される曲面を擬似波面と呼ぶ。

## 3 Envelope+SOC法[1]

Envelope+SOC法は凸形状境界面が $(X, Y, 0)$ を中心とし、 $Z$ を半径とする球群の外包絡面として表現されるという原理を利用する。また同手法は散乱波形のひずみによって生じる擬似波面推定誤差を補正する方法(SOC法)を併用し高速・高精度立体像推定を実現する。SOC法では擬似波面のひずみ補正量 $\Delta Z$ を次式で近似する。

$$\Delta Z = \frac{f_0}{W} (f_{tr}^{-1} - f_{sc}^{-1}) \quad (1)$$

ここで、 $f_{tr}$ と $f_{sc}$ は送信波形及び受信波形の中心周波数、 $f_0 = c/\lambda$ 、 $W$ は信号帯域幅に依存する正規化定数である。本稿では $W = 4$ とする。整合フィルタによる初期推定値 $Z_0$ に $\Delta Z$ を加えて $Z = Z_0 + \Delta Z$ と補正する。Envelope+SOC法では、各 $x, y$ に対して任意の凸形状目標境界 $z$ を次式で得る。

$$z = \max_{X, Y} \sqrt{Z^2 - (x - X)^2 - (y - Y)^2} \quad (2)$$

しかし、式(2)に基づく画像化では擬似波面の適切な平滑化を行わない場合、 $S/N < 30\text{dB}$ において像が著しく劣化する。図1の目標形状を仮定した場合の、 $S/N = 22\text{dB}$ における推定像を図2に示す。同図より、従来手法では

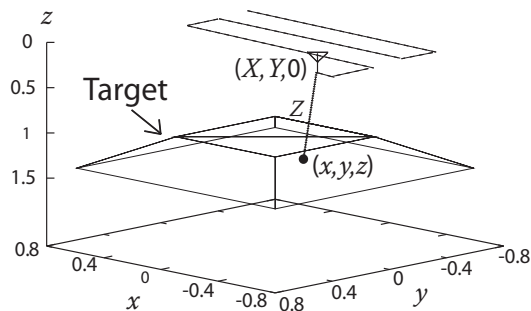


図1 システムモデル

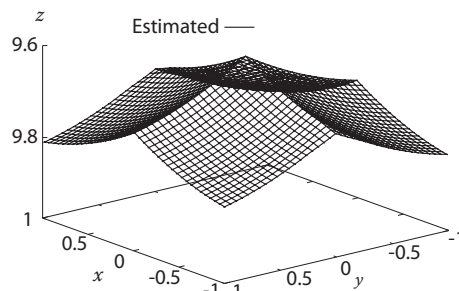


図2 従来手法による推定像 ( $S/N=22\text{dB}$ )

$S/N$ が低い場合に目標形状と全く異なる像が推定されることがわかる。これは、大きな推定誤差を有する $Z$ によるものである。

## 4 提案手法

前節で述べる問題点を解決するため、擬似波面平滑化法を提案する。大きな誤差を持つ像推定に適さない点を不適点と呼ぶ。本稿では凸形状目標の擬似波面は一価かつ連続であるという性質を利用し、不適点の $Z$ を再推定する。不適点は次式を満たす[2]。

$$(\partial Z / \partial X)^2 + (\partial Z / \partial Y)^2 \geq 1 \quad (3)$$

式(3)を満たし、かつ $S/N > \alpha$ である点を選択し、その周囲8点の $Z$ の中央値 $Z_m$ を求める。 $s(X, Y, Z)$ において $Z_m$ を中心に $\pm\lambda$ の範囲でピーク値を探索し、 $Z$ を更新する。以上の処理を全ての不適点について $M$ 回繰返す。ただし、 $s(X, Y, Z)$ の $S/N$ がある一定値 $\alpha$ 以下である場合、再推定は不可能と判定し除去する。

しかし、上述のピーク値再探索のみでは、再推定を誤った点などの不規則成分が残る。このような誤差の平滑化に適するフィルタにConditional Median Filter(CMF)がある。CMFは入力値を中心とするサイズ $N \times N$ の

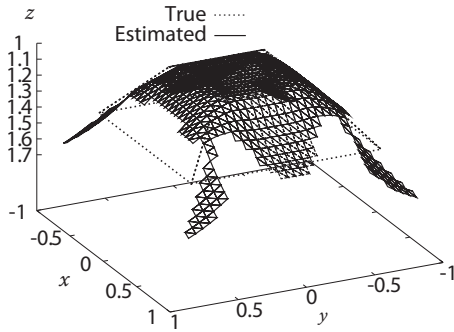


図3 擬似波面平滑化法による推定像 (S/N=22dB)

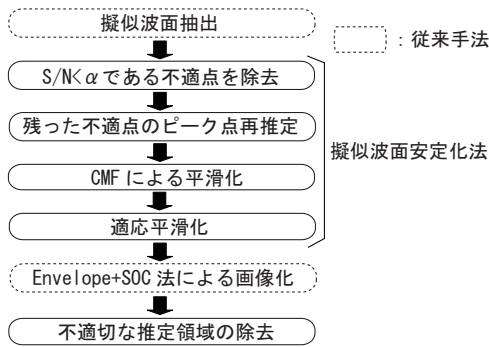


図4 提案手法の推定手順

フィルタの中央値を求め、入力値と中央値の差分がある一定値  $\beta$  より大きければ中央値を、そうでなければ入力値をそのまま出力するフィルタであり、前述の問題を解決する。特に擬似波面は非定常信号なので、CMFによる平滑化が有効である。

また、擬似波面の微小ゆらぎを抑圧するために適応平滑化法 [3] を用いる。同手法はガウシアンフィルタの相関長  $\sigma$  を擬似波面の曲率に応じて変化させる方法であり、 $\sigma$  は次式で求める。

$$\sigma = \sqrt{\delta Z / \pi} \quad (4)$$

ただし  $\delta$  はひずみの許容値である。

図2を生成したデータに提案擬似波面平滑化法を適用した場合の推定像を図3に示す。ただし、 $M = 3, N = 3, \alpha = 8.5\text{dB}, \beta = 0.5\lambda, \delta = 0.1\lambda$  とする。同手法により低 S/N の場合でも推定可能となるものの、目標の存在しない領域に不適当な像が推定されていることがわかる。これは、比較的大きな誤差を有する Z に対応する単一の球の一部である。

そこで、このような不適当な推定領域を信号強度を用いて除去する。i 番目のアンテナ位置から推定された像の面積を  $A_i$  とする。これの推定像としての妥当性を示す評価指標  $\phi_i$  を以下に導入する。

$$\phi_i = \max_Z s_i(X, Y, Z)^2 / (A_i / Z) \quad (5)$$

ただし  $s_i(X, Y, Z)$  は i 番目のアンテナの受信信号である。 $\phi_i$  は推定された像が妥当でない場合、他の  $\phi_i$  と比較して非常に小さな値をとる。このような領域は推定像として不適切と考え除去する。

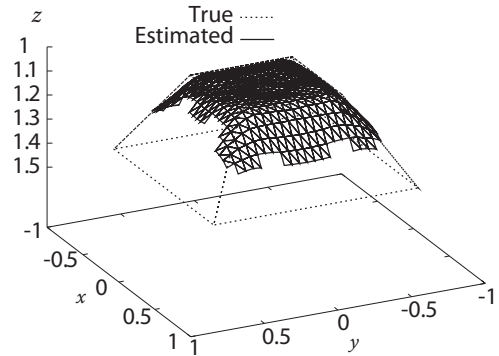


図5 提案手法による推定像 (S/N=22dB)

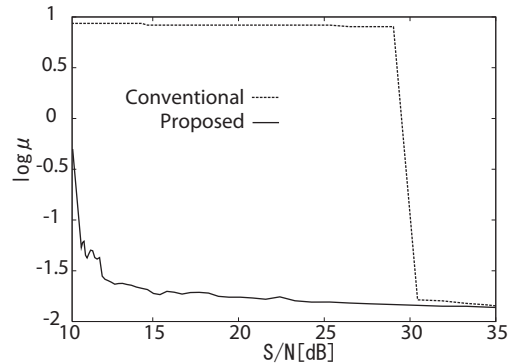


図6 S/N- $\mu$  特性

前述の推定領域の除去及び擬似波面平滑化法の併用を本稿における提案手法とする。提案手法の手順を図4に、図2を生成したデータに提案手法を適用した場合の推定像を図5に示す。同図より、提案手法を適用することで、低い S/N でも高解像度かつ高信頼度を有する形状推定が可能であることがわかる。また計算時間は 12.4 秒であり、最大 1 分程度とされる製品検査に適する。

5 雑音耐性評価

形状推定誤差評価のため、評価値  $\mu$  を以下に導入する。

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{N_T} \sum_{i=0}^{N_T} \min_x \|x - x_e^i\|^2} \quad (6)$$

ただし  $N_T$  は推定点数、 $x$  と  $x_e^i$  はそれぞれ真の目標境界点及び推定目標境界点の位置座標を示す。従来手法及び提案手法の S/N に対する  $\mu$  の変化を図6に示す。同図より、従来手法が S/N < 30dB 程度で推定精度が著しく劣化するのに対し、提案手法は S/N > 15dB 程度で  $\mu < 0.02\lambda$  の高精度なイメージングを実現することが確認できる。

参考文献

[1] 木寺正平, 阪本卓也, 佐藤亨, 電磁界理論研究会資料, EMT-07-116, pp.7-12, 2007.  
 [2] 佐藤亨, 阪本卓也, 信学論, VL.J88-B, pp.2311-2325, 2005.  
 [3] 阪本卓也, 木寺正平, 佐藤亨, 信学論, VL.J90-B, pp.63-73, 2007.