

適応的周波数補正を用いた 雑音耐性の高いUWBパルスレーダ高解像度立体像推定法

佐保 賢志[†] 木寺 正平[†] 阪本 卓也[†] 佐藤 亨[†]

[†] 京都大学大学院 情報学研究科
〒 606-8501 京都市左京区吉田本町
E-mail: †saho@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp

あらまし 工業製品の非接触精密計測技術として UWB パルスレーダが有望である。我々はこれに適する高速・高解像度形状推定手法である Envelope+SOC 法を提案している。この手法は散乱波形のスペクトルシフト量に基づいた距離補正を用いて 1/100 波長の超波長画像化を実現する。しかし低 S/N 環境下では雑音による散乱波のひずみのため、スペクトルシフト量の推定精度が著しく劣化し、高解像度を保持することが困難となる。本稿では S/N に応じて適応的にひずみ補正処理を用いることにより、低 S/N 環境下での雑音耐性を改善する手法を提案する。数値計算により、提案手法の特性評価を行い、従来手法に対して雑音耐性能力を大きく改善することを示す。

キーワード UWB レーダ, 高解像度立体像推定, Envelope+SOC 法, 適応的ひずみ補正

Robust and high-resolution UWB pulse radar imaging algorithm with adaptive frequency compensation

Kenshi SAHO[†], Shouhei KIDERA[†], Takuya SAKAMOTO[†], and Toru SATO[†]

[†] Graduate School of Infomatics, Kyoto University
Sakyou-ku, Kyoto, 606-8501, Japan
E-mail: †saho@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp

Abstract Target shape estimation with UWB pulse radar is promising as an imaging technique for product inspection. We have already proposed a 3-dimensional imaging algorithm Envelope+SOC. This method realize fast and high-resolution imaging with a spectrum offset correction (SOC), which directly compensates the range shift due to scattered waveform deformation. However, the Envelope+SOC does not work for lower S/N due to spectrum distortion by random noises. To enhance the performance of the Envelope+SOC for lower S/N, we propose a range compensation algorithm by adaptively changing a filtering method depending on S/N. The application example with a numerical simulation verifies the advantage of the proposed method in terms of robust and high-resolution imaging.

Key words UWB radar, High-resolution imaging, Envelope+SOC, Adaptive range compensation

1. ま え が き

UWB(Ultra Wide-Band) レーダを用いたイメージング技術が注目されている。同レーダは高い距離分解能を有し、車両や航空機等の鏡面構造製品の非接触精密計測に適している。従来のレーダ画像化技術として、合成開口処理、領域積分方程式、モデルフィッティング等に基づく手法などが提案されている [1]–[5]。しかしいずれも反復改良や繰り返し計算に基づくため、計算時間が膨大であり製品検査等の用途に適さない [5]。これに対し、我々は高速かつ高精度な立体像推定法で

ある Envelope+SOC(Spectrum Offset Correction) 法を提案してきた [6]–[8]。同手法は球群の包絡面を用いた高速かつ安定な画像化手法 Envelope 法と、散乱波形のスペクトルシフト量を用いた波形ひずみ補正法 SOC を用いて高解像度立体像推定を実現する。同手法はエッジ領域を含め推定誤差 1/100 波長程度の超波長画像化を実現する。しかし、低 S/N 環境下では Envelope+SOC 法の推定精度が著しく劣化する。これは雑音等の不規則信号に起因する大きな距離推定誤差によるものである。また、同環境下では雑音による散乱波形のひずみによってスペクトルシフト量を正しく推定できなくなり、分解能も劣化

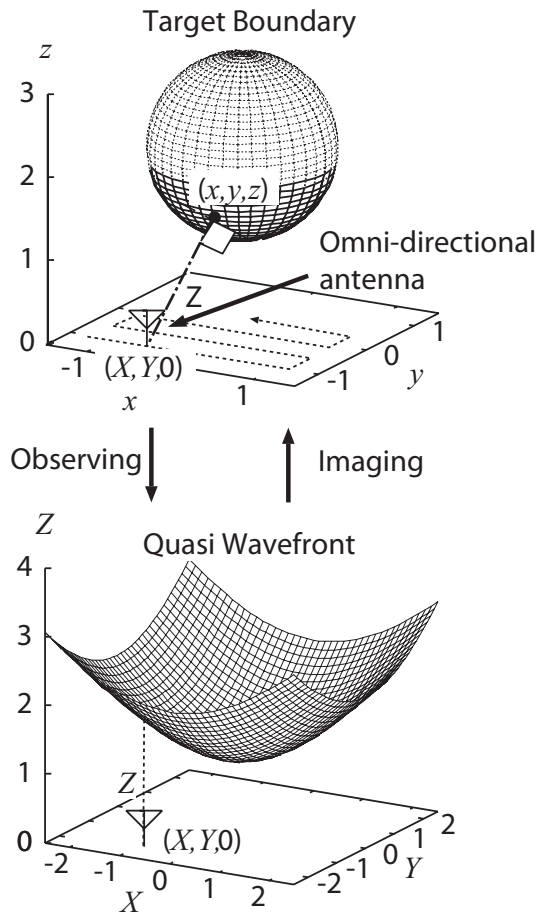


図1 システムモデル

する。

本稿では低S/N環境下でのEnvelope+SOC法の雑音耐性を改善するため、S/Nに応じた適応的なひずみ補正処理法を提案する。Envelope+SOC法と提案手法を併用することによって、低S/N環境下においても1/100波長精度を有する高解像度イメージングが可能であることを数値計算により示す。

2. システムモデル

本稿で用いるシステムモデルを図1に示す。パルスの送信を単一の無指向性アンテナを用いて行なうモノスタティックシステムを想定する。目標は明瞭な境界を有する任意の凸形状物体とする。電波の伝播速度は一定で既知とする。目標およびアンテナが存在する空間を (x, y, z) で表わす。アンテナは $z = 0$ 平面上を走査する。送信電流波形はモノサイクルパルスとし、その中心波長 λ で各空間座標を正規化する。アンテナ位置 $(x, y, z) = (X, Y, 0)$ で受信された時間信号に整合フィルタを適用した信号を $s(X, Y, Z')$ とする。但し $Z' = ct/(2)$ 、 c は光速、 t は時間である。 $s(X, Y, Z')$ のピーク値 Z を求め、 (X, Y, Z) で構成される曲面を擬似波面と呼ぶ。 (X, Y, Z) から (x, y, z) への変換により立体像推定を行う。

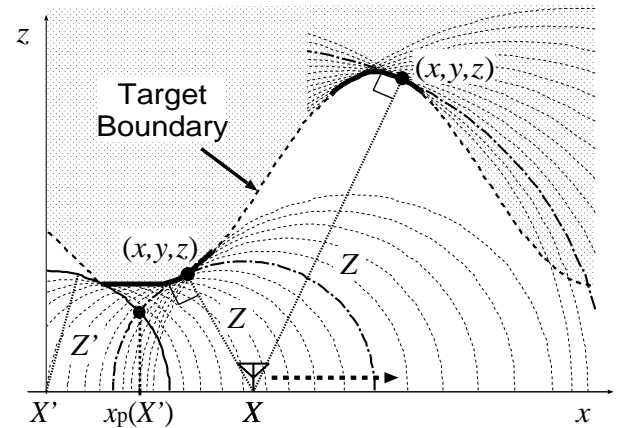


図2 物体境界と円包絡線との関係

3. 従来手法

3.1 Envelope+SOC法

我々は既に高速かつ安定な立体像推定法であるEnvelope法を提案している[6], [7]。同手法は任意の物体境界面が擬似波面から決定される球群の外包絡面または内包絡面と一致するという原理を利用する。図2に二次元問題における物体境界面と円の外包絡線及び内包絡線との関係を示す。この図は2次元モデルであるので球群の包絡面は円群の包絡線として表示されている。同図の通り、物体境界の一部はその曲率に応じて、円群の外包絡線または内包絡線に対応する。特に任意の凸立体境界は $(X, Y, 0)$ を中心とした半径 Z の球群の外包絡面として表現される。抽出された擬似波面を用いて各 (x, y) に対し、目標の z 座標を次式で定める。

$$z = \max_{X, Y} \sqrt{Z^2 - (x - X)^2 - (y - Y)^2} \quad (1)$$

推定境界面から擬似波面の端部領域に相当する球群を除去し、目標境界の領域を決定する。

このEnvelope法は類似の手法であるSEABED法[9]と異なり微分操作を含まず耐雑音性能が高いことが知られている。しかし、Envelope法のみによる画像化ではエッジからの散乱波のひずみによってエッジ付近に大きな推定誤差が生じる。図3に誤差が生じる場合の送信波形と散乱波形の整合例を示す。整合フィルタはそのインパルス応答と受信波形のたたみ込みで表わされる。この図は破線で示される送信波形が実線の受信波形と最大の相関を有する時間までシフトされたものである。同図の通り、散乱波形が送信波形に対して異なるため、距離推定誤差 ΔZ が生じる。我々は同距離誤差を補正する方法としてSOC(Spectrum Offset Correction)法を提案している[8]。SOC法では散乱波形が送信波形に対し、フーリエ変換の位相を保持しながら帯域変化することに着目し、擬似波面のひずみ補正量 ΔZ を次式で近似する。

$$\Delta Z = \frac{f_0}{W} (f_{tr}^{-1} - f_{sc}^{-1}) \quad (2)$$

但し 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 は信号比帯域幅に依存する正規化定数である。本稿では

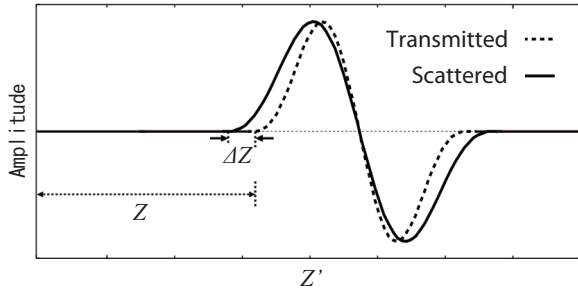


図3 送信波形と散乱波形の整合例

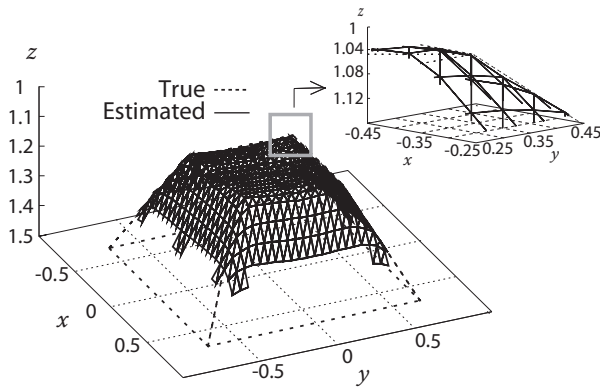


図4 従来手法による推定像 (S/N=32dB)

$W = 4$ とする．整合フィルタによる初期推定値 Z_0 に ΔZ を加えて $Z = Z_0 + \Delta Z$ と補正する．ここで f_{sc} は次式で求める．

$$f_{sc} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f|S(f)|df}{\int_{f_1}^{f_2} |S(f)|df} \quad (3)$$

但し $S(f) = \mathcal{F}[s(t)]$, $s(t)$ は散乱波の解析信号, f_1, f_2 は送信波の周波数スペクトルにおけるピーク値の 10% の値をとる周波数である．

SOC 法と Envelope 法を組み合わせた高速かつ高精度な立体像推定法を Envelope+SOC 法という [8] . 同手法は Envelope 法のみでは推定困難であったエッジ領域を, 推定誤差 1.0×10^{-2} 程度の精度で推定可能であり, 超波長解像度を実現する．

3.2 雑音環境下での従来手法による推定

本節では数値計算により従来手法である Envelope+SOC 法の低 S/N 環境下での特性を調べる．本稿では各アンテナ位置における受信波形を FDTD 法により計算し, それに正規乱数によりモデル化した白色性雑音を加算することで雑音環境下での特性を調べる．

図4に従来手法による推定像を示す．目標形状は同図に破線で示す台形状, S/N は 32dB である．各アンテナ位置での S/N は整合フィルタ通過後の最大信号電力と雑音平均電力の比と定義する．また本稿では立体像推定における S/N を各アンテナ位置での S/N の相加平均値と定義する．同図より, Envelope+SOC 法は十分な S/N が得られる場合は高解像度立体像推定を実現することが確認できる．なおアンテナ走査領域が不十分なために物体端部領域が再現されていないが, これは十分な走査領域

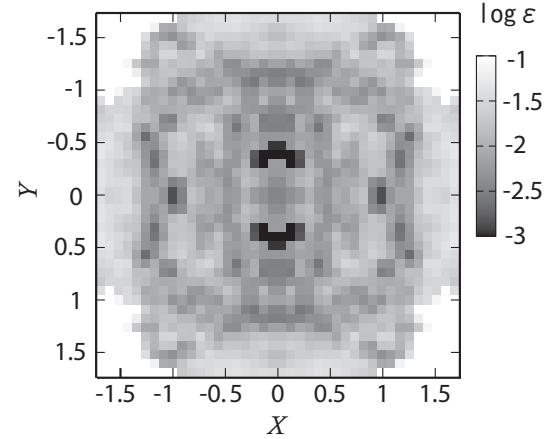


図5 擬似波面推定誤差 (S/N=21dB)

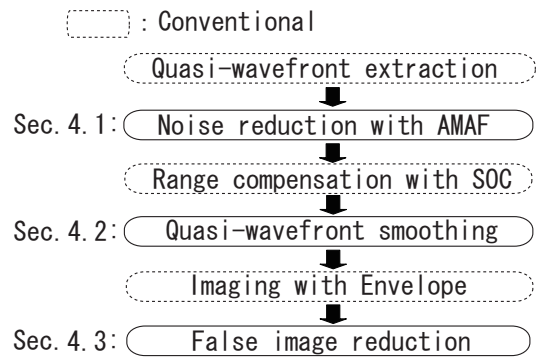


図6 提案手法の画像化手順

を取ることで推定可能となる．

一方, 低 S/N 環境下では擬似波面の適切な平滑化を行わない場合, 推定像と全く異なる像が推定されることを確認している．これは, インパルス的に生じる大きな距離推定誤差に起因するものである．図5に S/N=21dB における各アンテナ位置における擬似波面推定誤差を示す．目標形状は図4に示したものと同一である．ここで, $\epsilon = |Z_{true} - Z|$, Z_{true} は Z の真値である．同図より擬似波面端部領域を中心に推定誤差の著しく大きな点が多く存在していることが分かる．またエッジからの散乱波が卓越する領域 ($|X|, |Y| \simeq (0.7, 0.7)$) の推定誤差も比較的大きいことが確認できる．これらはいずれも白色性雑音に起因するものである．

4. 提案手法

本章では Envelope+SOC 法の特性を改善するためのひずみ補正法を提案する．まず 4.1 節では, S/N に対して適応的な移動平均フィルタを用いたひずみ補正処理法を提案する．同処理と SOC 法を組み合わせることで低 S/N 環境下でのエッジ領域の推定精度を改善する．次に 4.2 節で, 従来手法の雑音耐性を改善するために, 推定精度劣化の要因である比較的大きな誤差を擬似波面の領域で平滑化処理する手法を提案する．また, Envelope 法ではデータ欠損が存在する場合に虚像が生じる．4.3 節ではこのような虚像を信号電力を用いて除去する手

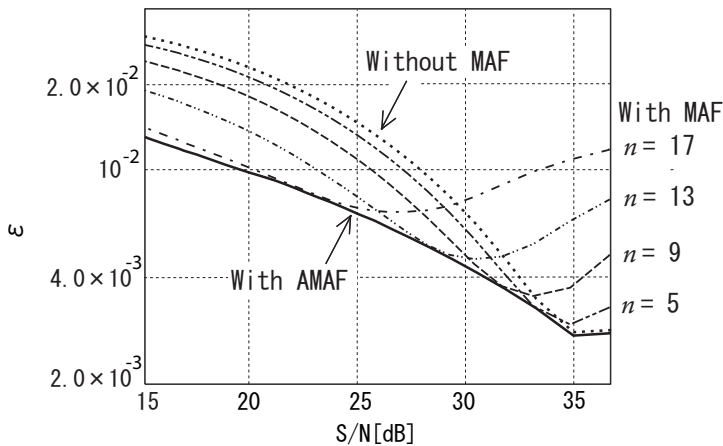


図7 移動平均フィルタを用いた場合の推定精度の推移

法を提案する．提案する画像化手順を図6に示す．以下では各提案手法について詳述する．

4.1 適応的移動平均フィルタによる雑音の影響低減

3.2節で述べたとおり，低S/N環境下ではSOCによる距離推定精度が劣化する．これは雑音による周波数スペクトル形状の劣化により式(3)による中心周波数推定に誤差が生じるためである．そこで本稿では移動平均フィルタ(Moving Average Filter, 以下MAFと表記する)を用いて信号を狭帯域化することにより雑音の影響を低減する手法を提案する． n 点MAFは時間領域において，着目点の値をその点とその直前の $n-1$ 点の値を平均した値に更新するフィルタであり，その周波数特性は次式で表される．

$$|H(f)| = \frac{1}{n} \left| \frac{\sin(2\pi f n \Delta t / 2)}{\sin(2\pi f \Delta t / 2)} \right| \quad (4)$$

ここで Δt は時間サンプル間隔である．式(4)に示されるとおり，MAFは周波数領域では帯域制限処理に相当する．この処理によって，雑音による中心周波数推定値の揺らぎを抑圧することができる．またフィルタ次数 n により通過帯域を変化させることができる．したがって，雑音の大きさに応じて n を適応的に変化させることが有効であると考えられる．これを適応的移動平均フィルタ(Adaptive MAF, 以下AMAFと表記する)と呼ぶ．

以下では，AMAFの特性及びパラメータ n の決定方法について検証と考察を行う．ここでは図4と同一の目標形状を仮定し，エッジ領域の散乱波が卓越する $(X, Y) = (0.779, 1.212)$ における Z の推定精度を検証する．図7に移動平均フィルタを用いない場合，及び $n = 5, 9, 13, 17$ のMAFを適用した場合の散乱波のS/Nに対する推定誤差 ϵ の変化を示す．同図の通り低S/Nでは n を増大させることが有効である．そこで各S/Nについて最良の精度を保持する n を選択し，同様に推定誤差を求めた結果を図7に実線で表す．これより，低S/Nでの推定精度が大幅に改善していることが分かる．最良なパラメータ n は Z の真値が既知でないと適用できない．しかし，一般的な傾向としてS/Nが低い場合に n を大きくすることは精度を必ず改善させるため，最適な n でなくとも精度の改善が十分に得られ

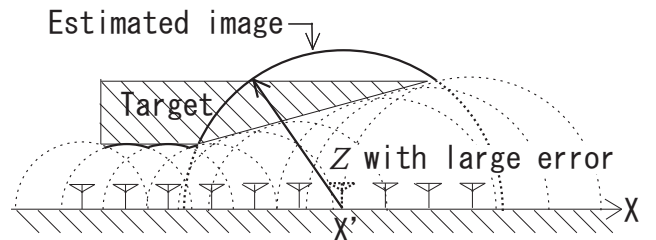


図8 大きな誤差が存在する場合の推定例

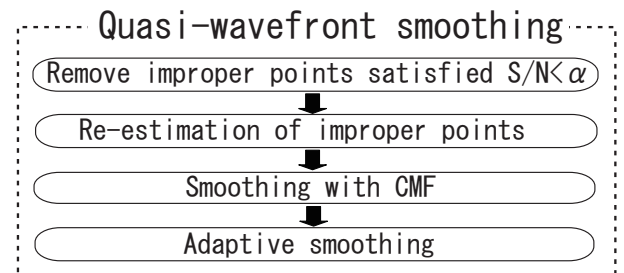


図9 4.2節の平滑化法の手順

る．このため図7で決定した n を用いたAMAFを各素子での散乱波形に適用する．

4.2 擬似波面平滑化処理

3.2節で述べたとおり，従来手法は低S/N環境下において像推定が困難となる．2次元問題において推定像が著しく劣化する例を図8に示す．同図ではアンテナ位置 $X = X'$ において大きな距離推定誤差が生じた場合を示している．このように，推定誤差の大きい Z に対応する球により推定像がマスクされてしまうために大きな誤差が生じる．この問題点を解決するための擬似波面平滑化法を提案する．大きな誤差を持つアンテナ位置を不適点と呼ぶ．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，次式を満たす点を不適点と定義する．

$$(\partial Z / \partial X)^2 + (\partial Z / \partial Y)^2 \geq 1 \quad (5)$$

このような点について Z を再推定する手法を以下に提案する．式(5)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．但し， $s(X, Y, Z)$ のS/Nがある一定値 α 以下である場合，再推定は不可能と判定し除去し，欠損データとする．

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誤差が残る．このようなインパルス的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 β 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．

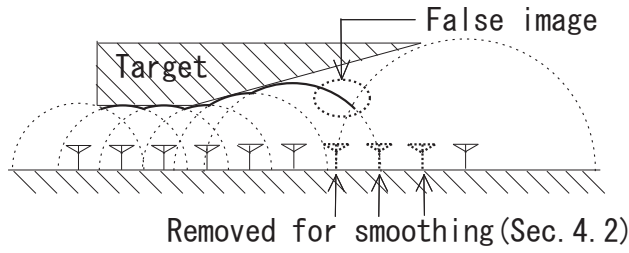


図 10 虚像が推定される例

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 [10] を用いる．同手法はガウシアンフィルタの相関長 σ を擬似波面の曲率に応じて変化させる方法であり， σ は次式で求める．

$$\sigma = \sqrt{\delta Z / \pi} \quad (6)$$

但し δ はガウシアンフィルタにより生じるひずみの許容値である．提案擬似波面平滑化法の手順を図 9 に示す．

4.3 虚像除去法

図 10 に 2 次元問題において虚像が生じる場合の例を示す．同図より，隣接するデータ点が除去されたとき，端点の円まで推定円を引き伸ばして推定するために虚像が生じることが分かる．そこで，このような像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妥当性を示す評価指標 ϕ_i を以下に導入する．

$$\phi_i = \begin{cases} \max_Z s_i(X, Y, Z)^2 / (A_i / Z) & (A_i \neq 0) \\ 0 & (A_i = 0), \end{cases} \quad (7)$$

但し $s_i(X, Y, Z)$ は i 番目のアンテナの受信信号， A_i は推定像の面積である．虚像は単一球の一部が誤って広く見えているものであるため，虚像に対応する A_i は比較的大きな値となる．また虚像はデータ欠損に起因して生じる．データ欠損は S/N が低い点で生じるため，虚像が生じやすい点に対応する散乱波の電力は比較的小さい．以上より ϕ_i は推定された像が虚像である場合，他の ϕ_i と比較して非常に小さな値をとるので，このような像を除去することが有効である．

5. 数値計算による特性評価

本稿における提案立体像推定法は従来手法に 4 章で述べた各手法を組み合わせたものである．そこで，本章ではそれぞれの手法による効果を明らかにするため，従来手法に各提案手法を一つずつ追加し，立体像推定によるその特性評価を与える．形状推定評価指標として次式で定義する最大推定誤差 μ_{\max} を用いる．

$$\mu_{\max} = \max_i \sqrt{\min_x \|x - x_e^i\|^2} \quad (8)$$

但し x と x_e^i はそれぞれ真の目標境界点及び i 番目の推定目標境界点の位置座標を示す．

まず，従来手法に 4.2 節で提案した擬似波面平滑化法を適用し検証する．これは低 S/N 環境下では，推定において最も大き

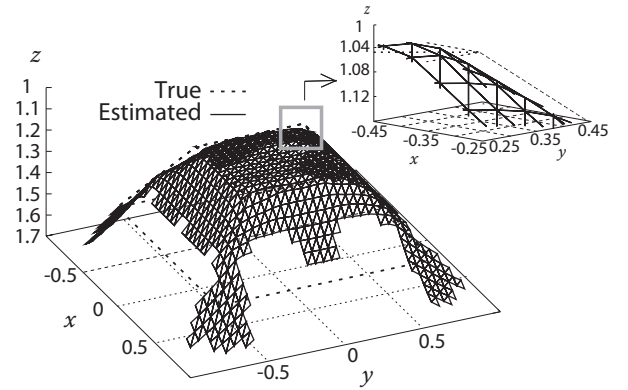


図 11 擬似波面平滑化法を適用した場合の推定像 ($S/N=21\text{dB}$)

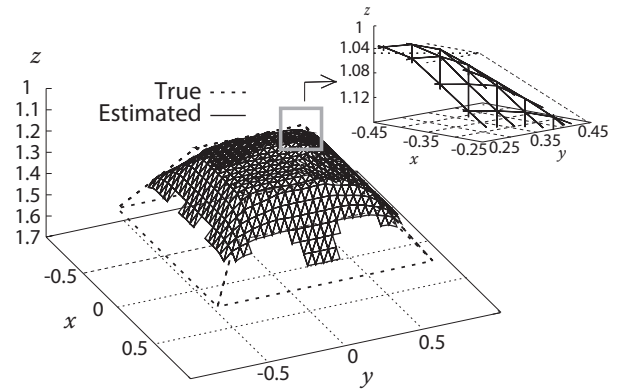


図 12 虚像除去法及び擬似波面平滑化法を適用した場合の推定像 ($S/N=21\text{dB}$)

な障害である比較的大きな誤差をもつ点の処理を行わなければ，立体像推定が困難なためである．図 11 に従来手法に擬似波面平滑化法を適用した場合の推定像を示す． S/N は 21dB であり，各パラメータは $M = 3, N = 3, \alpha = 8.5\text{dB}, \beta = 0.5\lambda, \delta = 0.1\lambda$ とする．従来手法では目標境界推定が困難であったのに対し，擬似波面平滑化法を併用することで高精度な立体像推定が実現可能となることが分かる．しかし，エッジ領域の推定精度が図 4 と比較して劣化している．また，目標の存在しない領域に虚像が推定されていることが確認できる．虚像の影響を受けているため最大推定誤差 μ_{\max} は 2.14×10^{-1} となっている．

次に，4.3 節で提案した虚像除去法を追加する．図 12 に虚像除去法と擬似波面安定化法 (4.2 節) を適用した場合の推定像を示す．提案手法により虚像が除去され，精度のよい像のみが推定されていることが確認できる．この場合の μ_{\max} は 2.91×10^{-2} である．この最大誤差はエッジ領域で生じている．

AMAF を追加し，提案手法をすべて適用した場合の推定像を図 13 に示す．同図よりエッジ領域の推定精度が改善し，高解像度な立体像推定を実現していることが確認できる． μ_{\max} は 1.33×10^{-2} である．以上より，提案手法により低 S/N 環境下での推定精度を大幅に改善できることが分かる．なお，計算時間は AMF Athlon 2.1GHz processor で約 15 秒であり，最大一程度とされる製品検査に適用可能である．

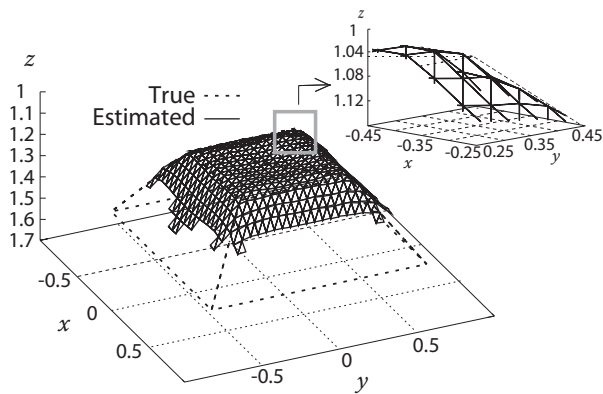


図 13 提案手法による推定像 (S/N=21dB)

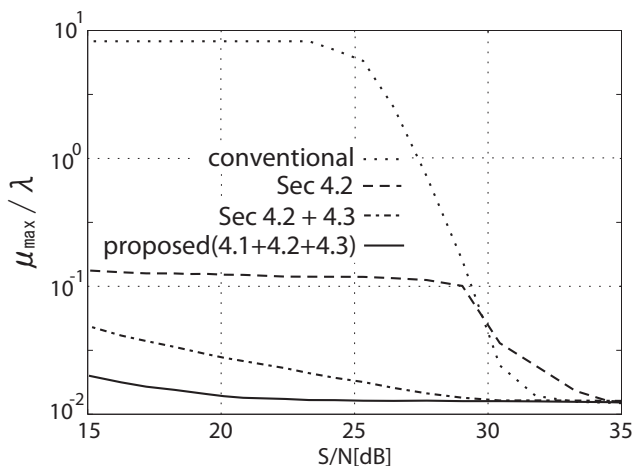


図 14 μ_{\max} の推移

また、以下では提案手法による雑音耐性の改善度を評価する。従来手法と以上の各手法における S/N に対する μ_{\max} の変化を図 14 に示す。従来手法が S/N < 30dB 程度で著しく推定精度が劣化するのに対し、擬似波面平滑化処理により低 S/N での推定精度を大幅に改善している。また、虚像除去法を追加することでさらに推定精度を改善している。これは擬似波面平滑化処理のみを用いた場合の最大誤差は虚像に対応するためである。さらにこの場合の最大誤差はエッジ領域から推定されているため、AMAF を適用することで低 S/N 環境下でのより高精度な立体像推定が実現している。提案立体像推定法は S/N > 18dB 程度で $\mu_{\max} < 1.5 \times 10^{-2} \lambda$ の精度を維持している。以上より各提案手法を併用した提案アルゴリズムが雑音耐性改善に有効であることが確認できる。

6. むすび

Envelope+SOC 法による高解像度立体像推定のための適応的な平滑化処理法及びびみ補正法を提案した。本手法によって低 S/N 環境下においてもエッジ領域を含めた高解像度立体像推定を実現することを示した。提案手法は S/N > 18dB 程度で推定誤差の最大値が $1.5 \times 10^{-2} \lambda$ 以下であり、低 S/N 環境下でも高精度な推定を実現する。また、計算時間は AMF Athlon 2.1GHz processor で約 15 秒であり、最大一分程度とされる製品検査に適用可能な処理速度である。但し、本稿では数値計算で白色雑音

のみを仮定した検証を行ったため、今後は実環境下での検証が必要である。

文 献

- [1] 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, 2001.
- [2] 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, 2001.
- [3] T. Sato, K. Takeda, T. Nagamatsu, T. Wakayama, I. Kimura and T. Shinbo, "Automatic signal processing of front monitor radar for tunneling machines," *IEEE Trans. Geosci. Remote sens.*, vol.35, no.2, pp.354–359, 1997.
- [4] 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.
- [5] 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, 2005.
- [6] S. Kidera, T. Sakamoto, and T. Sato, "High-resolution and fast 3-D imaging algorithm with spectrum shift for UWB pulse radars," *2nd European Conference on Antenna and Propagation (EuCAP2007)*, pp.11–16, 2007.
- [7] S. Kidera, T. Sakamoto, and T. Sato, "A robust and fast imaging algorithm with an envelope of circles for UWB pulse radars," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E90-B, pp.1801–1809, 2007.
- [8] S. Kidera, T. Sakamoto, and T. Sato, "A robust and fast 3-D imaging algorithm without derivative operations for UWB radars," *International URSI Commission B Electromagnetic Theory Symposium*, no.EMTS084, pp.26–28, 2007.
- [9] T. Sakamoto, "A fast algorithm for 3-dimensional imaging with UWB pulse radar systems," *IEICE Trans. on Commun.*, vol.E90-B, no.3, pp.636–644, 2007.
- [10] 阪本 卓也, 木寺 正平, 佐藤 亨, 杉野 聡, "UWB パルスレーダによる高速立体形状推定法の実験的検討," *電子情報通信学会論文誌*, vol.J90-B, no.1, pp.66–73, 2007.