## 回転目標モデルにおけるRPM法を用いた高速立体像再構成法

山田 浩之<sup>†</sup> 木寺 正平<sup>††</sup> 桐本 哲郎<sup>††</sup>

† 電気通信大学 大学院電気通信学研究科 〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
†† 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
E-mail: †yamada@secure.ee.uec.ac.jp

あらまし ビル等の人工構造物に適する立体像推定法として, ISAR 画像上のレイオーバを利用した手法が提案され ている.同手法では観測方向が異なる複数の ISAR 画像間の目標点像を追跡処理しているため, 散乱中心が連続的に 移動する非点状目標の場合では,推定精度が著しく劣化する場合がある.本稿では,任意形状を有する目標の高速・ 高精度立体像推定を実現する RPM(Range Point Migration)法を回転目標モデルへと拡張し,上記問題を解決する. 数値計算により,提案手法の有効性を示す.

キーワード ISAR, RPM法, 立体像再構成, 高精度イメージング

# High-speed 3-dimensional Target Reconstruction Algorithm with RPM Method Extended to Rotating Target Model

Hiroyuki YAMADA<sup>†</sup>, Shouhei KIDERA<sup>††</sup>, and Tetsuo KIRIMOTO<sup>††</sup>

† Graduate School of Electro-Communications, University of Electro-Communications 1-5-1 Chohugaoka, Chohu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications 1-5-1

Chohugaoka, Chohu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: †yamada@secure.ee.uec.ac.jp

Abstract A 3-dimensional reconstruction algorithm based on a layover appeared in ISAR image has been proposed, which is suitable for an artificial structure target such as buildings. However, the existing algorithms assume only a point target or its aggregate, and require a tracking process of them on multiple ISAR images. Then, in the case of a non-point target, this algorithm severely distorts its positioning accuracy because a scattered center point on target surface continuously moves along the observation angle. To overcome this difficulty, this paper extends RPM (Range Points Migration) method to ISAR observation model, in order to achieve accurate target boundary extraction for arbitral 3-dimensional shape. The results of numerical simulation prove that the proposed algorithm with two array antennas remarkably enhances the accuracy for a non-point 3-dimensional target shape.

 ${ { { Key words } } } { { ISAR, RPM, 3-dimensional image reconstruction , Accurate imaging } } \\$ 

### 1. まえがき

画像レーダは,光学装置が適用困難な夜間,悪天候,粉塵環境 下で運用が可能である.特に同画像を利用した,3次元目標位置 再構成技術は,地震災害後の建造物及び,道路等の崩壊状況把握 や沿岸警備における不審船検知等において有望である.地形変 動に起因する高度変化の推定法として,SAR(Synthetic Aperture Radar) 画像間の位相干渉に基づくInSAR(Interferometric SAR) が知られている.同手法では高さが連続的に変化する山 などの自然物の場合は高い精度を確保する一方,ビルなどの 人工建造物においては精度が不十分であることが報告されて いる[1][2].また,レーダ画像固有の幾何学的歪みであるレイ オーバを利用した,ISAR(Inverse SAR)画像上の目標追跡に よる立体像再生法が提案されている[3][4][5].同手法は観測方 向の異なる複数のISAR 画像における目標点移動量抽出から, 最小二乗法により目標の3次元位置を推定する.同手法は,目 標が複数の点群で構成される場合においては,高精度な立体像 推定を実現することが確認されている[6].しかし,複数ISAR 画像間の目標点追跡に基づくため,目標境界上の散乱中心が連 続的に変化するワイヤ等の非点状目標の場合では,推定精度が



図 1 システムモデル Fig. 1 System model.

著しく劣化する場合がある.

一方,散乱体の散乱中心の移動に対応できる立体像推定アル ゴリズムとして RPM (Range Point Migration)法が提案さ れている[7].同手法は取得された目標距離点群の大域的分布と 信号強度から,散乱波の到来角度を高精度に算出し,複雑な形 状を持つ複数目標に対する高速かつ高精度な推定を可能とする. 本稿では、同手法を回転目標モデルへと拡張する.更に垂直方 向のアンビギュイティを抑圧するために2つの送受信素子を用 いることで,非点状目標に対する3次元形状推定推定精度を確 保する.数値計算により,提案手法の有効性を示す.

2. 観測モデル

図1に観測モデルを表す.送受信素子を $(0, y_1, z_1)$ に配置する.目標は等速度で回転すると仮定し,回転速度は既知とする. z 軸を目標の回転軸とする.目標形状は任意とする.同目標境界線及び面を点目標の集合で近似し,回転角度 $\theta$ における,目標からの受信信号 $S(f, \theta)$ を次式で与える.

$$S(f,\theta) = \sum_{m=1}^{M} A \exp\left(-j2\pi f \frac{2R_m(\theta)}{c}\right)$$
(1)

但し, A は各点目標の反射振幅であり, 一定とする. M は点 目標の総数である.  $R_m(\theta)$  は回転角  $\theta$  における素子と点目標 間の距離である. 周波数は  $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$  の範囲とする. 但 し,簡単のため散乱における周波数特性及び, 多重散乱は考慮 しない.

#### 3. 従来法

ISAR モデルに基づく立体像再構成法として,目標点座標追跡に基づく手法が提案されている[4][5].同手法は各観測角  $\theta_n$  で得られた ISAR 画像の特徴点を追跡し,目標点の3次元座標位置を最小二乗法で推定する.以下に,同手法を説明する.

目標の回転角が $\theta_n(n = 1, ...N)$ のときの ISAR 画像を  $I_n(x, y)$ とする.  $I_n$ は PFA(Polar Format Algorithm) [8] に より再生する.  $I_n(x, y)$ の極大値を線形内挿により求め,目標点 を抽出する. 画像  $I_n$ における m 番目の位置座標を( $x_{n,m}, y_{n,m}$ )と定義する.  $(x_{n+1,m}, y_{n+1,m})$ を次式で求める.



図 2 8 点目標に対する ISAR 画像 ( 左: $\theta_n = 0$ , 右: $\theta_n = \pi/9$  ) Fig. 2 ISAR images for 8 point targets (left: $\theta_n = 0$ , right: $\theta_n = \pi/9$ ).



図 3 8 点目標に対する従来法適用例



$$(x_{n+1,m}, y_{n+1,m}) = \operatorname*{argmax}_{(x_{n+1,m'}, y_{n+1,m'})} \left\{ \sqrt{(x_{n+1,m'} - x'_{n,m'})^2 + (y_{n+1,m'} - y'_{n,m'})^2} \right\}$$
(2)

但し,式(2)右辺の {\*} 内の値が設定閾値を超える場合,同目 標点をクラッタ等の雑音に起因する点として除去する.閾値を 距離分解能とする.

 $m{b}_m = [x_{1,m},\ldots,x_{n,m},y_{1,m},\ldots,y_{n,m}]^T$ とし,m番目の目標の位置座標  $m{p}_m$ を次式で求める.

$$\boldsymbol{p}_m = \left(\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{A}\right)^{-1} \boldsymbol{A}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{b}_m + \boldsymbol{p}_c \tag{3}$$

但し,  $A = [e_x(1), \dots, e_x(n), e_y(1), \dots, e_y(n)]^T$ である.ここで,  $e_y(n), e_x(n)$ は観測面を示す方位ベクトルであり,回転角 $\theta_n$ により決まる. Wは対角行列であり,対角要素は各画像での目標点の信号強度で与えられる. $p_c$ は原点から画像中心に向かうベクトルである.

8 点の点目標を直方体の頂点上に配置した目標について,従 来法を用いて立体像を再構成する. $S(f,\theta)$ は, $0 \le \theta < 2\pi$ の 間で,等間隔に 3600 点サンプルする. この $S(f,\theta)$ に PFA を 適用し,等間隔に 360 個の ISAR 画像を再生する.観測周波 数幅は  $f_{\min} = 22$ GHz から  $f_{\max} = 40$ GHz であり,中心波長 は 9.7mm である.距離分解能は 10mm である.素子位置は  $(x, y, z) = (0, -3.14 \times 10^2 \lambda, 1.65 \times 102\lambda)$ とする.図2に観測 信号による点目標の ISAR 画像を示す.但し $\theta_n = 0, \pi/9$ であ る.また図3 に本手法による推定像を示す.同図より,目標 8







図 5 複数円目標に対する従来法適用例

Fig. 5 Reconstruction image by the conventional method for multiple circular targets.

点全てが推定されていることが確認できる.目標推定結果の精度, $\epsilon({m R}^i_e)$ を以下の式によって定義する.

 $\epsilon(\boldsymbol{R}_{e}^{i}) = \min_{\boldsymbol{R}} |\boldsymbol{R} - \boldsymbol{R}_{e}^{i}|, (i = 1, 2, ..., M_{T})$   $\tag{4}$ 

ここで, R 及び  $R_{e}^{i}$ は,それぞれ真の目標座標及び推定座標で あり, $M_{T}$ は推定された目標点の総数である.図3に示される 推定精度の平均誤差は $0.29\lambda$ であり,最大誤差は $0.56\lambda$ である.

次に非点状目標の推定例を示す.2つの円状ワイヤ目標 を立体交差させる.円の半径は $1.03 \times 10\lambda$ である.図4に  $\theta_n = 0, \pi/9$  での ISAR 画像を,図5に本手法での推定像を 示す.データサンプル数,素子位置は前例と同じである.図5 より,従来手法では目標の一部のみが再構成可能であり,また 推定精度も劣化することがわかる.同推定精度の平均誤差は  $3.15 \times 10\lambda$ であり,最大誤差は $7.21 \times 10\lambda$ である.これは,本 手法が点目標追跡に基づくためであり,図4のように散乱中心 が連続的に変化する非点状目標では,追跡誤差が顕著となるた めである.また,同手法の精度は目標点追跡に強く依存するた め,多数の目標点像が分解能セル内に集中する場合,同精度は 著しく劣化する.

#### 4. 提案法

前述の問題を解決するため,本稿では RPM 法 [7] を回転目 標モデルへ拡張する.但し, z 方向のアンビギュティを解消す



図 6 提案法のシステムモデル Fig.6 System model of the proposed method.



図 7  $z = z_1$  平面上の円とその交線  $l_i$  の配置 Fig. 7 Arrangement of circles and their intersection line  $l_i$  at  $z = z_1$  plane.

るため,素子をy方向に追加する.図6に提案法のシステムモ デルを示す.目標回転モデルでは,素子は回転中心を中心とす る同心円状に走査することと等価となる.同手法では,まず距 離点群を抽出する.距離抽出には,複数干渉波の高分解能距離 推定が可能である Capon 法を用いる[9].Capon 法の出力は強 度情報を保有し,到来波数推定が不要であるため,RPM 法に 適する.周波数領域の観測信号に Capon 法を適用し,距離点 群(X,Y,R)を得る.但し, $(X,Y) = (y_1 \cos \theta, y_1 + y_1 \sin \theta)$ であり,Rは推定距離である.RPM 法では,目標散乱中心位 置が,各素子位置(X,Y,0)を中心,観測距離Rを半径とする 球上に存在すると仮定する.同手法は,周囲の素子の距離点群 (X,Y,R)の大域的分布を用いて,以下の式(5)で目標形状境界 面の点群の(x,y)座標を推定する.

$$(x,y) = \operatorname{argmax}_{(x,y)} \left| \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{T}}} s(\phi_i, R_i) \exp\left(-\frac{d^2(x,y)}{2\sigma_d^2}\right) \right. \\ \left. \times \exp\left\{-\frac{(X-X_i)^2 + (Y-Y_i)^2}{2\sigma_r^2}\right\} \right| \quad (5)$$

-3 -





但し, $s(\phi_i, R_i)$ は, $\phi_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ での観測位置における $R_i$ での信号振幅強度であり, $N_T$ は距離点群の総数である. $\sigma_r$ , $\sigma_d$ は定数であり,経験的に決定する.d(x, y)は直線 $l_i$ と平面上の座標(x, y)の距離である.直線 $l_i$ は半径Rの球と半径 $R_i$ の球との交線の $z = z_1$ 平面上の投影である.図7に, $z = z_1$ 平面上での各球の交線 $l_i$ と散乱点位置の(x, y)座標との関係を示す.散乱点位置のz座標を $z = z_1 - \sqrt{R^2 - (x - X)^2 - (y - Y)^2}$ とする.同操作を全ての距離点群について行い,目標形状境界面の点群を得る.

本手法では,逆合成開口処理が不要であり,距離空間から目 標空間への直接的な写像に基づくため,空間分解能は距離分解 能のみに依存する.また,観測信号強度が微弱なエッジ領域に おいても,距離分布が正確に抽出されれば,式(5)の評価値が 増大するため,推定可能である.

#### 5. 性能評価

本節では,数値計算により各手法の性能評価を与える. 図8に真の距離点群を与えた場合の提案手法の推定像を示 す.但し,目標形状は図5と同じであり,素子は $(0, -3.14 \times 10^2\lambda, 1.65 \times 10^2\lambda), (0, -3.45 \times 10^2\lambda, 1.65 \times 10^2\lambda)$ に配置す る. $\sigma_r = 0.4, \sigma_d = 0.005$ とする.同図に示される通り,高精 度な3次元の目標推定が可能となっていることがわかる.平均 誤差は $0.26\lambda$ ,最大誤差は $0.54\lambda$ である.

次に,距離点群が未知の場合の推定像を示す.式(1)で生成 される観測信号に,Capon法を適用することで距離点群を得る. 雑音を考慮しない.図9に抽出される距離点群を示す.Capon 法によりレンジサイドローブ抑圧効果によって,高精度に距離 点群が抽出されることが分かる.図10に同距離点群に提案法 を適用する場合の推定像を示す.凡そ全ての目標境界線上で再 構成が可能であることが分かる.但し,円状ワイヤが交差する 部分で推定精度の劣化が確認できる.同部分は,図9での交差 部分に対応し,二つの目標境界からの干渉に起因する距離誤差 により推定像が劣化するためである.図11に各 $\epsilon$ に対する目 標点のヒストグラムを示す.提案法の平均誤差は0.55 $\lambda$ であり,



#### 図 9 複数円目標における抽出距離点群





#### 図 10 複数円目標に対する提案法適用例(距離点群:未知)

Fig. 10 Reconstruction image by the proposed method when range points are unknown.



図 11 各  $\epsilon$  に対する目標点数 Fig. 11 Number of the estimated target points for each  $\epsilon$ .

最大誤差は 2.29λ である. 同図より, 従来法で生成される誤差 10λ 以上の推定点を抑圧し, 0.3λ 付近の推定点を増大させるこ とが分かる.



図 12 雑音状況下での抽出距離点群 Fig.12 Extracted range points at S/N=40 dB.



図 13 雑音状況下での提案法の適用例 Fig.13 Estimated target points of the proposed method with noise.

次に,雑音を加えた場合での提案法の性能評価を行う.式 (1) に受信機雑音  $n(f, \theta)$  を与える.ここで  $n(f, \theta)$  は平均 0 の 白色性複素ガウス雑音とする.以下の式によって S/N を定義 する.

$$S/N(\theta) = 10 \log_{10} \frac{\max |\boldsymbol{s}(t,\theta)|^2}{E[|\boldsymbol{n}(t,\theta)|^2]}$$
(6)

但し, $s(t,\theta)$ , $n(t,\theta)$ は $s(f,\theta)$ , $n(f,\theta)$ の時間領域表現であ り, $E[|n(t,\theta)|^2]$ は時間平均を示す. $S/N(\theta)$ を全ての観測角度 で平均し,S/Nと定義する.図12に抽出される距離点群を示 す.但し,以降全てS/N=40dBである.雑音成分に起因する 不規則な距離誤差が特に $\theta = \pi/3$ 付近で大きくなることが確認 できる.図13に同距離点群に提案法を適用する場合の推定像 を示す.平均誤差は $3.33\lambda$ であり,最大誤差は $17.78\lambda$ である. 同図より全体的に推定精度が劣化していることがわかる.

次に直方体形状における提案法の推定例を示す.このとき目 標は直方体状にワイヤを設置し,原点を直方体の中心とする.直 方体の辺の長さはそれぞれ 1.03×10λ,1.45×10λ,1.03×10λ である.従来法による推定像を図 14 に示し,提案法による推



#### 図 14 直方体状目標に対する従来法の適用例





図 15 直方体状目標に対する提案法の適用例

Fig. 15 Estimated target points of the proposed method with rectangular parallelepiped.



図 16 各 *ϵ* に対する目標点数



定像を図 15 に示す. 図 14 及び図 15 より,提案法が直方体 エッジをより高精度に推定することが分かる.提案法で直方体 の各辺が推定されないのは,同領域からの信号が局所的な素子 位置でしか観測されないため,式(5)右辺の評価値が増大しな いためと考えられる.一方,エッジからの散乱波は広範な素子 範囲で観測されるため,同評価値が増大し,推定像として構成 される.各手法における  $\epsilon$  に対する目標点のヒストグラムを図 16 に示す.従来法の平均誤差は  $1.48\lambda$ ,最大誤差は  $4.64\lambda$  であ る.提案法の平均誤差は  $0.39\lambda$ ,最大誤差は  $2.71\lambda$  である.同 図より,直方体形状の場合でも,高い推定位置精度を保持する ことが分かる.

#### 6. 結 論

本稿では,非点状目標形状の立体像再構成を実現するため, RPM 法を回転目標モデルへと拡張した.従来法は ISAR 画像 上の目標点追跡に基づくため,ワイヤ等の非点状目標では3次 元形状の推定精度が著しく劣化する場合があった.これに対し, 目標距離点群を利用した到来角度推定に基づく RPM 法を,回 転目標モデル及び2素子アレイに拡張することで,高精度な3 次元形状推定アルゴリズムを導出した.数値計算を用いた性能 評価により,円状ワイヤ目標及び直方体目標において,平均誤 差が円状ワイヤ目標では0.55 $\lambda$ ,直方体目標では0.39 $\lambda$ と従来 法に比して大幅に推定精度を改善させることを確認した.雑音 環境下での特性改善が今後の課題である.

#### 文 献

- H. A. Zebker and R. M. Goldstein, "Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observation", *Proc. of 1996 IEEE Radar Conference*, pp. 309-314, 1996.
- [2] Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., et al, "Synthetic aperture radar interferometry", *Proc of IEEE*, vol. 88, pp. 333-382, Mar. 2000.
- [3] J. Fortuny, "An efficient 3-D near-field ISAR algorithm", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 34, pp. 1261-1270, Oct. 1998.
- [4] 山本和彦,岩本雅史,"逆合成開口レーダを用いた目標の3 次元形状の推定," 信論(B), vol. J85B, no.11, pp. 1944-1951, Nov. 2002.
- [5] 山本和彦, 岩本雅史, "バイスタティック ISAR を用いた目標の 立体視法," 信学技報, SANE2005-97, pp.7-11, Feb., 2006.
- [6] 山田浩之,木寺正平,桐本哲郎,"レイオーバを用いた3次元レー ダ画像再生のための目標点追跡アルゴリズム,"電子情報通信学 会総合大会, B-2-65,東北大学, Mar. 2010.
- [7] S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, "Accurate UWB Radar 3-D Imaging Algorithm for Complex Boundary without Range Points Connections", *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol.48, no. 4, pp. 1993–2004, Apr., 2010.
- [8] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, "Spotlight Synthetic Aperture Radar-Signal Processing Algorithms", Artech House, 1995
- [9] J. Capon,"High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis", *Proc. IEEE*, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, Aug. 1969.