

# 回転を含む任意運動目標に対応した 5 アンテナ UWB レーダイメージングシステム

阪本卓也\*, 佐藤 亨 (京都大学)

UWB Radar Imaging of a Target with Arbitrary Translation and Rotation Motion  
using a Small Number of Antennas  
Takuya Sakamoto and Toru Sato (Kyoto University)

## Abstract

Ultra Wide-Band (UWB) radar has been considered a promising technology for the development of a reliable security system. The development of a simple high-resolution radar imaging system on a cost-effective basis is particularly relevant. One important factor is the number of antennas used for imaging as this affects the cost effectiveness of UWB radar. A number of imaging methods and systems have been proposed with better capability. However, these methods employ systems with large scale antenna arrays, which makes them too costly to use in practice. Matsuki et al. proposed a UWB radar imaging method using only three antennas by estimating the motion of the target, assuming that the target moves in unknown orbit without rotation. This paper presents a UWB radar system using five antennas for simultaneous estimation of the target's shape, translation and rotation. The performance of the proposed method is established by numerical simulations.

キーワード：人体，UWB パルスレーダ，形状推定，回転運動，平行移動  
(human body, UWB pulse radar, shape estimation, rotation, translation)

## 1. はじめに

近年，セキュリティを目的とした各種センサ・システムの開発が盛んに研究されている．現在主に使用されているのはカメラを用いたシステムであり，比較的安価に高い推定分解能を提供できる利点がある．一方，電波を用いたシステムはカメラと異なる多くの特徴を有するため，今後の研究への期待が高まっている．例えば電波を用いることで，壁での透過・反射という性質を利用し，単一のシステムのみで複数の部屋や家屋全体をカバーすることも可能である．既存の無線 LAN の基地局を用いた目標位置決定技術はそのうちのひとつである．この手法は新たにインフラを設置する必要がないという利点がある一方で求まるのは目標の位置のみであり，形状推定は原理的に困難である．別の手法として UWB (超広帯域) レーダ技術があげられる．超広帯域信号は 500MHz 以上の帯域幅あるいは 20%以上の比帯域幅を有し，一般に数 cm の分解能でのイメージングを実現できる．従来のイメージング手法はマイグレーション法などに代表される波形を直接扱う手法が主なものであり，このために演算量が増大し，セキュリティシステムなどに要求されるリアルタイム処理への応用が

困難であった [1] ~ [4]．そこで近年，SEABED 法や Envelope 法などエコーのレンジ情報のみに特化した信号処理法が開発されてきた [5], [6]．これらの手法は目標と媒質の境界が明確に定義できるという前提のもとで高速なイメージングを実現することが明らかになっている．

しかし，これらの手法はいずれも多くのアンテナを必要とするために高コストとなり，実用上の大きな問題となっていた．Matsuki et al. [7] は SEABED 法を拡張することで 3 アンテナのみを用いたイメージング手法を開発した．この手法は運動目標を想定し，アンテナと目標の相対運動を推定することで目標の運動軌道を決定し，その運動を補償することで目標の像を得る．この手法は様々な数値計算や実験データへの適用により有効性が明らかになりつつあるが，想定する運動が平行移動のみであり回転運動に対応していないために実際のセキュリティシステムで対象とする人体のイメージングを行う上での問題となっていた．本稿ではこの問題を解決するためにアンテナ数を 3 から 5 へ増やし，目標形状を局所的に楕円近似することで任意かつ未知の平行移動および回転運動を行う目標のイメージング手法を提案する．提案手法の特性を数値計算により明らかにする．

## 2. システムモデル

本稿では2次元モデルを仮定し、目標の2次元形状の推定を目的とする。一定間隔  $\Delta x = 0.2\text{m}$  で  $x$  軸上に5素子のアンテナを設置する。この  $x$  軸は例えば通路などの壁に相当し、その横を通過する人体の断面形状の推定が実際の状況と考えることができる。各々のアンテナはRF(Radio Frequency)スイッチを介して信号発生器および受信機に接続され、それぞれが独立したモノスタティックレーダシステムを構成する。他アンテナから送信される信号からの影響を防ぐため、直交符号変調などによる多重化方式を採用していることを想定する。各アンテナからは一定時間間隔  $\Delta t$  で信号が送信され、エコーは同じアンテナでのみ受信される。

目標は未知の形状を有しているとし、 $(X_0(\xi), Y_0(\xi))$  と表される閉曲線で表現される。ここで  $0 \leq \xi \leq 2\pi$  は媒介変数である。ここで目標形状の表現  $(X_0(\xi), Y_0(\xi))$  は次式を満たすものとする。

$$\int_0^{2\pi} X_0(\xi) d\xi = 0 \quad (1)$$

$$\int_0^{2\pi} Y_0(\xi) d\xi = 0 \quad (2)$$

すなわち、物体外周の重心を原点とする。これらの条件を課すことにより、以下で議論するとおり原点を中心とした回転運動を目標形状の表現に依存せずに定義できる。目標は時間  $t$  に応じて未知の平行移動  $(X_T(t), Y_T(t))$  および未知の回転運動  $\phi(t)$  を行う。この場合、時刻  $t$  における目標形状  $(X(\xi, t), Y(\xi, t))$  は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} X(\xi, t) \\ Y(\xi, t) \end{bmatrix} = R(\phi(t)) \begin{bmatrix} X_0(\xi) \\ Y_0(\xi) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_T(t) \\ Y_T(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで  $R(\phi)$  は回転行列

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

である。第  $i$  アンテナと散乱中心の間の距離  $R_i(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) は各時間ステップ  $t = n\Delta t$  において測定される。本稿の目的はこれらの5つの距離データ  $R_i(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) のみを用いて平行移動  $(X_T(t), Y_T(t))$ 、回転運動  $\phi(t)$  および目標形状  $(X_0(\xi), Y_0(\xi))$  の全てを推定することである。

## 3. 提案手法

### 3.1 楕円モデルを用いた最適化による運動推定手法

提案手法は各時刻  $t = t_n$  において目標の局所的な形状を推定する。この推定には楕円モデルを使用し、楕円は5つのパラメータ  $a, b, x_0, y_0, \theta$  で表される。楕円はこれらのパラメータを用いて次式で表される。

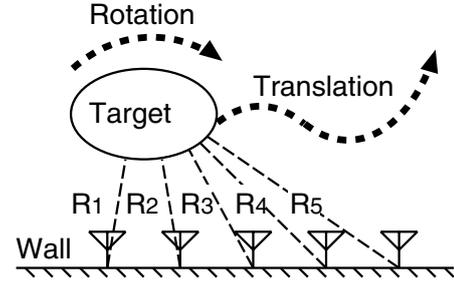


図1 システムモデル

Fig. 1 Assumed system model.

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right) (x - x_0)^2 \\ & + \left( \frac{\sin^2 \theta}{a^2} + \frac{\cos^2 \theta}{b^2} \right) (y - y_0)^2 \\ & + \sin 2\theta \left( \frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) (x - x_0)(y - y_0) = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで  $a$  および  $b$  は長軸および短軸の長さ、 $(x_0, y_0)$  は楕円の中心位置、 $\theta$  は回転角である。 $i$  番目のアンテナと対応する散乱中心位置  $c(x_i|a, b, x_0, y_0, \theta)$  の間の距離を  $r(x_i|a, b, x_0, y_0, \theta)$  と表すこととする。ここで  $x_i$  は  $i$  番目のアンテナ位置であり、時間とともに変化しない。散乱中心  $c(x_i|a, b, x_0, y_0, \theta)$  は楕円上の点のうちで最もアンテナ位置  $x_i$  に近い点と同一である。これは、凸閉曲線上の点が外部の点  $P$  から下ろした垂線の足である場合、この点よりも  $P$  に近い点はこの曲線上に存在しないためである。

コスト関数を次式のとおり定義する。

$$\begin{aligned} & F_n(a, b, x_0, y_0, \theta) \\ & = \sum_{i=1}^{N_a} |r(x_i|a, b, x_0, y_0, \theta) - R_i(t_n)|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで  $N_a = 5$  はアンテナ数である。次式のとおりこのコスト関数を最小化することで、最適な楕円パラメータセットを決定することができる。

$$(a_n, b_n, x_{0n}, y_{0n}, \theta_n) = \arg \min F_n(a, b, x_0, y_0, \theta) \quad (7)$$

この最適化処理を行うためには各時刻  $t = t_n$  における散乱中心位置  $c_{n,i}$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) を推定する必要がある。この推定には事前に推定されたパラメータ  $(x_{0n}, y_{0n}, a_n, b_n, \theta_n)$  およびアンテナ位置を用いる。散乱中心座標  $c_{n,i}$  は各アンテナから楕円に下ろした垂線の足を計算することで求められる。楕円に下ろした垂線の足は解析的に求めることができる。これについては付録に示す。こうしてコスト関数を解析的に記述した上で非線形最適化手法として知られる Levenberg-Marquardt法を用いる。Levenberg-Marquardt法は最小化問題のうちで最適解のコスト関数が零に近くなる場合に高速かつ安定な最適化を実現する [8]。

こうして求まったパラメータのうちで  $(x_0, y_0)$  は目標の平行移動を表し,  $\theta$  は目標の回転運動を表す. ただし, 楕円モデルの対称性により  $\theta$  は  $\pi$  の整数倍の不確定性を有する. つまり,  $m$  を任意の整数としたとき  $\theta + m\pi$  は全て同じモデルを表す. このため最適化処理の出力として得られる  $\theta$  をそのまま採用すると不連続点が生じ, 正しい回転運動の推定ができない. このため, 本提案手法では得られた  $\theta_n$  の値を 1 時間ステップ前に得られた値  $\theta_{n-1}$  を用いて

$$m = \arg \min |\theta_n - \theta_{n-1} + m\pi|^2 \quad (8)$$

なる最適化により時間ステップ間のギャップが最小になるように補正を行う. こうして最終的に  $\theta_n \leftarrow \theta_n + m\pi$  として回転角を推定する.

### 3.2 目標の運動補償によるイメージング処理

前節で推定された目標の運動をもとに目標形状の推定を行う. 推定された散乱中心位置を用いて, これらに対して運動を補償することでイメージングを行う. 散乱中心位置を用いるのは, 楕円モデルが近似するのは目標形状のうちで散乱中心付近のみの局所的な形状のみであるので, 楕円モデル全体を用いることは不合理であるからである. 前節の式 (7) の最適化処理において散乱中心  $c_{n,i}$  と  $i$  番アンテナの距離が  $r(x_i|a, b, x_0, y_0, \theta)$  に相当するため, すでに散乱中心位置  $c_{n,i}$  は計算されており, ここで再計算する必要はない. 提案手法では, 推定平行移動  $(x_{0n}, y_{0n})$  および回転運動  $\theta_n$  が補償され, 任意の時間の目標形状を求めることができる. 本稿では時刻  $t = 0$  における目標位置・形状の推定を行うこととする. 運動補償は以下の式のとおり容易に実現することができる.

$$\begin{bmatrix} \hat{X}_0^{(n,i)} \\ \hat{Y}_0^{(n,i)} \end{bmatrix} = R(-\theta_n) \left( c_{n,i} - \begin{bmatrix} x_{0n} \\ y_{0n} \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

## 4. 数値計算による提案法の特性評価

### 4.1 目標が楕円形状の場合の適用例

図 2 はアンテナアレイおよび楕円形目標が時計方向に回転しながら右手方向へ移動する状況を示す. ここで形状パラメータの真値として  $a = 15\text{cm}, b = 10\text{cm}, \theta = -\pi/4$ , 平行移動

$$X_T = x_0 + v_x t \quad (10)$$

$$Y_T = Y_{T0} + Y_{Ts} \sin(\omega_0 t + \chi_0) \quad (11)$$

および回転運動

$$\phi(t) = \phi_0 \sin(\omega_\phi t) \quad (12)$$

を仮定する. ただし  $x_0 = -0.4\text{m}, v_x = 2.0\text{m/s}, Y_{T0} = 0.5\text{m}, Y_{Ts} = 0.1\text{m}, \omega_0 = 2\pi\text{rad/sec}, \chi_0 = \pi/3\text{rad}, \phi_0 = 1.3\pi\text{rad}$ , および  $\omega_\phi = \pi\text{rad/sec}$  とする.

同図において  $x$  軸上の 5 つの逆三角形のシンボルはアンテナ位置を示す. 実線は目標のいくつかのスナップショットを示す. 白丸は実際の目標の中心位置を示す. 図 3 の黒丸は推定された散乱中心位置  $c_{n,i}$  を示す. この散乱中心は各時間ステッ

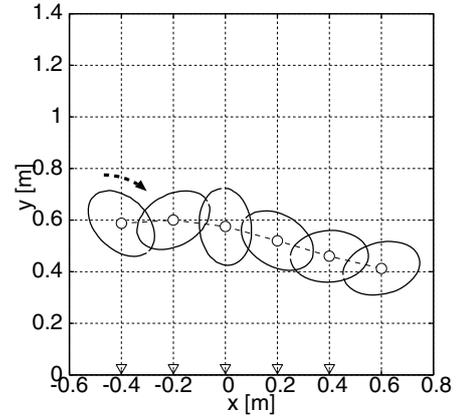


図 2 想定する楕円形状目標および回転を含む運動

Fig. 2 Assumed elliptic target shape and motion with rotation.

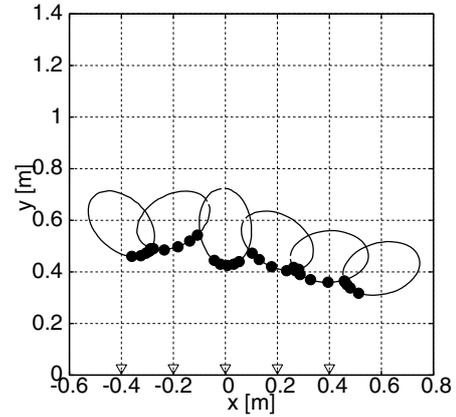


図 3 楕円形状目標上の推定散乱中心位置

Fig. 3 Estimated scattered points for an elliptic target.

プにおいて式 (7) によって推定されたパラメータから計算される. ここで, アンテナ数が 5 であるために各時間ステップ毎に 5 点の散乱中心が推定されていることが確認できる. これらの推定散乱中心は推定運動を補償することで式 (9) のとおり初期時刻  $t = 0$  の位置へ変換され, 図 4 に示す推定像が得られる. 同図より, 提案手法により目標形状は正しく推定されていることがわかる. これは, 実際の目標形状が楕円であり, 提案手法の使用する楕円モデルと完全に一致するためである.

### 4.2 目標が非楕円形状の場合の適用例

次に, 非楕円の一般形状の目標に提案手法を適用し, 特性を調べる. ここでは次式に示す目標形状を仮定する.

$$\begin{bmatrix} X_0(\xi) \\ Y_0(\xi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(1 + \delta \cos \xi) \cos \xi \\ b(1 + \delta \cos(\xi + \pi/4)) \sin \xi \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで  $\delta = 0.1$  とする. 図 5 にこのモデルにより生成される非楕円形状目標の例を示す.  $\delta$  を 0.0 から 0.3 まで変えた場合に, 完全な楕円である  $\delta = 0.0$  から  $\delta$  が増大するにしたがっ

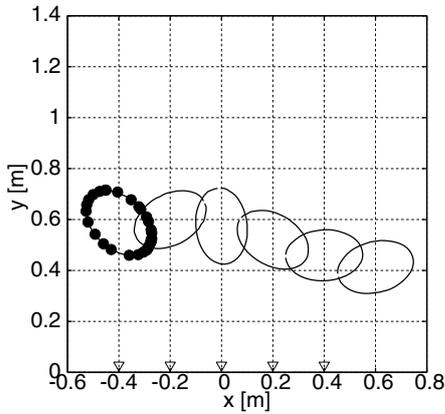


図 4 楕円形状目標に対して運動補償をおこなうことで推定された像  
Fig.4 Estimated elliptic target shape after compensation for the motion.

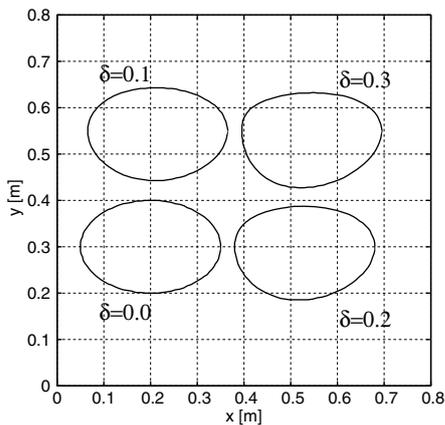


図 5 異なる  $\delta$  に対する非楕円目標形状の例  
Fig.5 Assumed target shapes with different  $\delta$  values.

て少しずつ形状が歪んでいくことがわかる。

図 6 に 5 アンテナでそれぞれ測定された目標までの距離を示す。目標形状は単純であるが運動が複雑なため、測定距離は複雑な変化を示す。図 7 の黒丸は推定された散乱中心を示す。楕円形状目標の場合と同様に概ね正しく位置が推定されている。図 8 の破線は推定された散乱中心から得られる楕円形状を示す。同図より推定楕円は実際の目標形状と一致していないことがわかる。これは、非楕円形状の目標の局所的な特徴から楕円を決定しているため、一般的にこの楕円と目標の全体形状は散乱中心付近を除いて一致しないことによるものであり、問題とはならない。こうして各時間ステップで推定された楕円モデルの中心位置をプロットすると目標の平行移動の推定値となる。推定された平行移動を図 9 に白丸で示す。いくつかの場所で実際の軌道と異なる経路が推定されていることがわかる。図 10 に推定された回転角および実際の回転角を示す。最初と最後の部分でよい一致を示す一方で、平

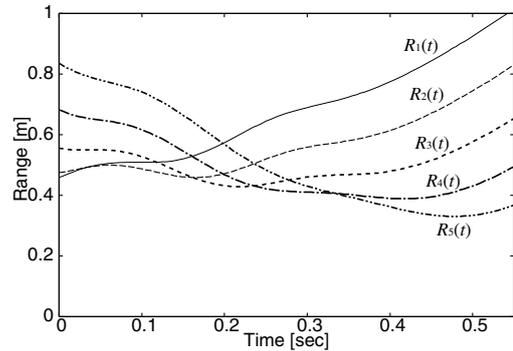


図 6 5 アンテナで測定された各時刻の測定距離  
Fig.6 Measured range data using 5 antennas.

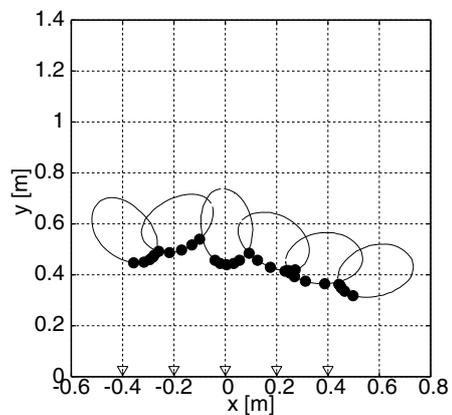


図 7 非楕円形状目標に対する推定散乱中心  
Fig.7 Estimated scattering centers for non-elliptic target.

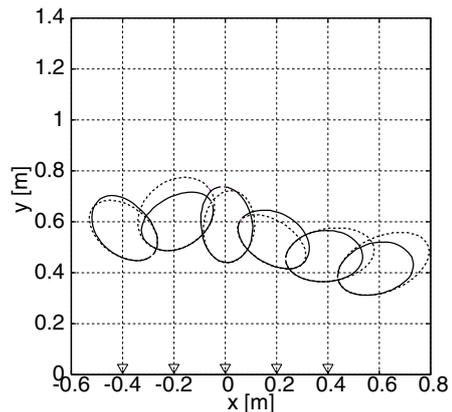


図 8 非楕円形状目標を局所的に表現する推定楕円  
Fig.8 Estimated elliptic models for non-elliptic target.

行移動の推定精度が低下する付近において回転角の推定精度も悪化し、誤差は最大で 0.45rad に至る。

図 11 に非楕円目標を用いた場合の推定目標形状を示してい

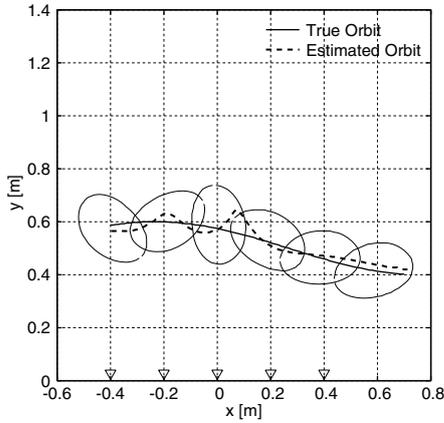


図 9 非楕円形状目標に対して推定された平行移動および実際の平行移動軌跡

Fig.9 Estimated and actual translation orbits for non-elliptic target.

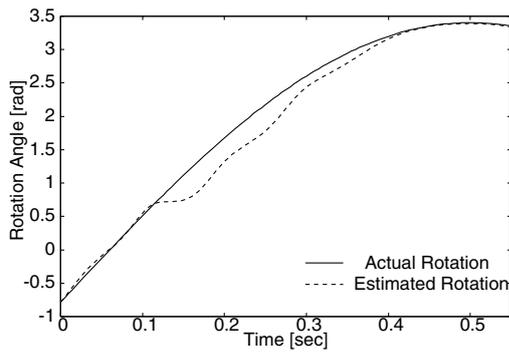


図 10 非楕円形状目標に対して推定された回転運動および実際の回転運動

Fig.10 Estimated and actual rotation angles for non-elliptic target.

る．目標形状の全体像はおおよそ推定されているものの，楕円目標を仮定した場合に比べて推定精度は低い．これは提案手法により目標形状が楕円でないにもかかわらず，局所的に楕円フィッティングされることが原因であり，モデルと目標の形状の差異が最終的に得られる像の精度低下の原因である．この近似誤差は散乱中心位置の推定精度のみならず，目標の平行移動および回転運動の推定精度も低下させ，これらの要因が重なって最終的なイメージング精度として表れている．特に，図 9 にみられる平行移動の推定精度が低いいくつかの場所では，目標のアンテナ側の形状が楕円モデルによる近似誤差を大きくしていると思われる．どのような形状においてこのような大きな誤差が起こるのかを詳しく調べるのが今後の課題である．

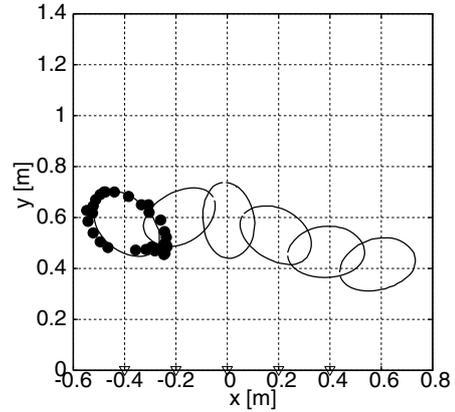


図 11 非楕円形状目標に対する運動補償後の推定形状

Fig.11 Estimated non-elliptic target shape after compensation for the motion.

## 5. 結 論

本稿ではセキュリティシステムへの応用を想定し，UWB レーダのための簡易なシステムによるイメージング技術を提案した．従来提案されていた 3 アンテナを用いたイメージング手法では，目標の平行移動のみを考慮していたため，回転運動を伴う目標については適用できなかった．この従来法では目標を局所的に円で近似することで平行移動の推定を行っていたため，円の点対称性により本質的に回転運動を記述できなかった．本稿では楕円モデルを使用し，楕円の自由度と同じ 5 つのアンテナを利用したシステムを用いたイメージング手法を開発した．提案手法では各アンテナから散乱中心までの距離を用いて目標の形状を局所的に楕円で近似することにより，楕円の中心位置から平行移動を，楕円の傾きから回転運動をそれぞれ推定することができる．数値計算により，目標が完全な楕円形状の場合には正しい推定像が得られ，非楕円形状の場合にもある程度の誤差は生じるものの全体の形状が推定されることがわかった．この提案手法は初めて任意の未知平行移動・回転運動を伴う未知形状目標のイメージングを 5 アンテナのみ使用する簡易なシステムで実現できるという点で，精度についての懸念は残るものの有効なアプローチと考えられる．今後，提案手法を改良することで，非楕円形状目標に対する推定精度を改善することが重要な課題である．

## 付 録

ここでは楕円外の点  $P$  から楕円  $E$  の上を下ろした垂線の足を求める手順を示す．解析が容易になるよう座標軸を次のように設定する．座標原点は楕円の中心となるように定義する．また，楕円の長軸が  $x$  軸上となるよう定める．この座標系において点  $P$  の座標を  $X = (X, Y)$  とする．楕円  $E$  上の点を

$$v(\theta) = \begin{pmatrix} a \cos \theta \\ b \sin \theta \end{pmatrix} \quad (14)$$

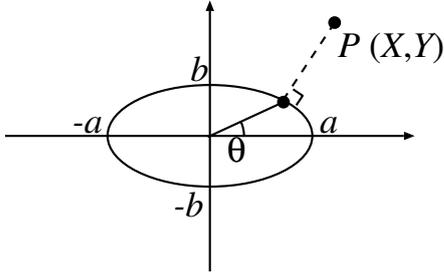


図 12 楕円上に下ろした垂線と座標系.

Fig. 12 Estimated target shape with the proposed method.

ここで垂線の条件より

$$(X - v(\theta)) \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} v(\theta) = 0 \quad (15)$$

が成り立ち、変形することで次式を得る.

$$-aX \sin \theta + bY \cos \theta + (a^2 - b^2) \sin \theta \cos \theta = 0 \quad (16)$$

ここで  $t = \sin \theta$  とおくことで 4 次方程式

$$A_4 t^4 + A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t + A_0 = 0 \quad (17)$$

に帰着される. ここで

$$A_0 = -b^2 Y^2, \quad (18)$$

$$A_1 = -2b(a^2 - b^2)Y, \quad (19)$$

$$A_2 = a^2 X^2 + b^2 Y^2 - (a^2 - b^2)^2, \quad (20)$$

$$A_3 = 2b(a^2 - b^2)Y, \quad (21)$$

$$A_4 = (a^2 - b^2)^2 \quad (22)$$

である. 4 次方程式の解の公式である Ferrari の公式により解析的に 4 つの解  $t_1, t_2, t_3, t_4$  が求められる. このうちで実数解を選び,  $\theta = \arcsin(t)$  として  $\theta$  を得る. この際, 複数の  $\theta$  が得られた場合,  $v(\theta)$  と  $X$  の距離が最も短くなる解を選択する. こうして求める垂線の足  $v(\theta)$  を得ることができる.

#### 文 献

- [1] A. G. Yarovoy, T. G. Savelyev, P. J. Aubry, P. E. Lys, L. P. Lighthart, "UWB array-based sensor for near-field imaging," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 55, no. 6, part 2, pp. 1288-1295, June 2007.
- [2] L. Jofre, A. Broquetas, J. Romeu, S. Blanch, A. P. Toda, X. Fabregas, A. Cardama, "UWB tomographic radar imaging of penetrable and impenetrable objects" Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 2, pp. 451-464, 2009.
- [3] Y. Wang, Y. Yang, A. E. Fathy, "Experimental assessment of the cross coupling and polarization effects on ultra-wide band see-through-wall imaging reconstruction," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pp. 9-12, June 2009.
- [4] A. Nelander, "Switched array concepts for 3-D radar imaging," Proc. 2010 IEEE Radar Conference, pp. 1019-1024,

2010.

- [5] T. Sakamoto and T. Sato, "A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform," IEICE Transaction on Communications vol. E87-B, no. 5, pp. 1357-1365, May 2004.
- [6] 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.
- [7] Y. Matsuki, T. Sakamoto and T. Sato, "Study of a method for 2-D imaging of simple-shaped targets with arbitrary motion using UWB radar with a small number of antennas," Proc. 20th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, Sep. 2010.
- [8] D. W. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters," J. Soc. Indust. Appl. Math., vol. 11, no. 2, pp. 431-441, 1963.