

多重反射波を利用したUWBレーダによる運動目標の影領域イメージング

藤田 修平[†] 阪本 卓也[†] 佐藤 亨[†]

[†] 京都大学大学院情報学研究科
〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町

あらまし 光学カメラを補完または代替する室内監視システムの開発に、高い距離分解能を有するUWB (Ultra Wide-Band) パルスレーダの利用が有望視されている。我々は壁面多重反射波を利用した単一アンテナによる点目標の位置推定手法を提案し、簡易で高性能な室内監視システムの実現を目指してきた。本稿ではより実践的な監視システムの実現を目指し、走査型単一アンテナによる多重反射波を利用した有限形状目標のイメージング手法を提案する。提案手法では、各壁面に対して想定される鏡像アンテナに対し干渉計法を適用することで目標のイメージングを行う。また時間逆転法及びドップラー効果を用いた虚像除去により、目標が影領域に存在する場合でも、高精度なイメージングを実現する。数値計算により提案手法の特性評価を行い、高精度なイメージングを実現することを示す。
キーワード UWB パルスレーダ, 多重反射波, 影領域イメージング, 干渉計法, 時間逆転法, ドップラーレーダ

Accurate Imaging with UWB Radar Using Indoor Multipath Echoes for a Moving Target in Shadow Regions

Shuhei FUJITA[†], Takuya SAKAMOTO[†], and Toru SATO[†]

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University
Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

Abstract UWB (Ultra Wide-Band) pulse radar is promising for surveillance systems because it has outstanding high range resolution. To realize an accurate UWB radar imaging system, we propose a new approach that employs multipath echoes from a target in an indoor environment. Using multipath echoes, the proposed system can accurately estimate images, even for targets in a shadow region where the targets are out of sight of the antenna. We apply a simple interferometry technique using the multiple mirror image antennas created by multipath propagation. We found that this simple method also produces many undesired false image points. To address this issue, we propose an effective false image reduction algorithm, using time-reversal imaging and the Doppler effect, to obtain a clear image. Numerical simulations verify that most of the false image points are removed and the target shape is estimated accurately.

Key words UWB pulse radar, multipath scattering waves, shadow region imaging, interferometry, time-reversal imaging, Doppler radar

1. はじめに

治安の悪化に伴ない、一般家庭やオフィスビルにおける侵入検知のための室内監視システムの需要が近年高まっている。現在これらの監視システムには、コストや水平解像度の観点から光学カメラが主に用いられている。しかし、一般に壁や設置物の死角となる場所が発生しないように複数のカメラの設置が必要となり、より簡易な監視システムが望まれている。これらの監視システムには電波を用いた手法が有効である。WLAN 基地局等の既存の電波発生源を利用することで、侵入者の場所や

行動を感知する手法が開発されている [1]。同手法は、光学カメラでは死角となり監視できない影領域においても目標の検出が可能であるが、目標の正確な形状推定を行うことは困難である。

目標の位置や形状の正確な情報を得るための手法として、解像度の観点から UWB パルスレーダが有望視されている。我々は既に、室内の多重散乱環境を利用した単一アンテナによる目標の位置推定手法を提案している [2], [3]。同手法は本来は虚像推定の要因となる壁面での多重反射波を利用することで、反射波が存在しない場合よりも高精度な位置推定を実現する。しかし目標の形状推定を想定する場合、十分な解像度が得られない。

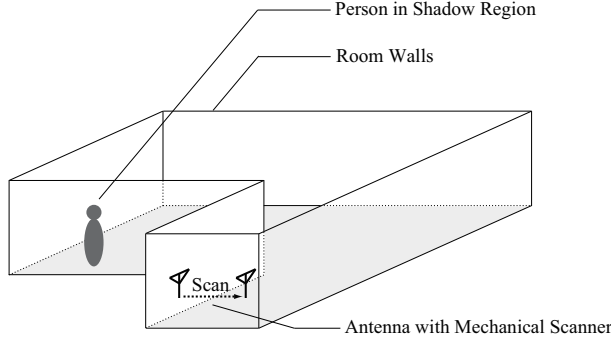


図 1 提案室内監視システムの概観

本稿では走査型単一アンテナを想定し、壁面での多重反射波を利用した有限形状目標の形状推定手法を提案する。同手法は干渉計法、時間逆転法及びドップラー効果を利用することで、目標が影領域に存在する場合においても高精度なイメージングを実現する。まずは UWB レーダを用いた従来手法について説明し、これらの手法では十分な推定が実現しないことを示す。次に提案手法の手順を説明し、数値計算によりその特性を評価する。

2. システムモデル

本稿で提案する室内監視システムの概観を図 1 に示す。多角形により構成される室内に走査型単一アンテナを設置し、目標の形状推定を行う。アンテナ位置及び壁面位置は既知とし、目標の位置及び形状は未知とする。

本稿では簡単のため二次元化されたモデルについて検討を行う。図 2 及び図 3 に本稿で想定するシステムモデルを示す。図 2 に示すモデルには、壁によりアンテナからの直達波が遮断される領域が存在する。本稿ではこれを影領域と呼ぶ。アンテナ及び目標の存在する空間を実空間と定義し、 $r = (x, y)$ で表す。目標及び壁面は完全導体より構成され、明瞭な境界を有する。また、目標は速度ベクトル $v = (v_x, v_y)$ を持つ。運動は回転を伴わず、速度ベクトルは目標境界上の各点において一定であるとする。 $y > 0$ に 180° の均一な指向性を持つ送受信アンテナを x 軸方向に走査し、間隔 Δx でパルスの送受信を繰り返す。送信パルスはレイズドコサイン波形で変調し、中心周波数及び帯域幅はそれぞれ 79 GHz, 1.4 GHz とする。アンテナの走査時間は十分に短く、その間に目標は移動しないものとする。アンテナ位置 $(x, y) = (X, y_0)$ における受信信号から目標が存在しない場合に得られる受信信号を除去したものを $s'(X, Y)$ とする。ここで、 $Y = ct$, c は電波伝搬速度、 t は受信時間である。 $s'(X, Y)$ に整合フィルタを適用し、得られる波形を $s(X, Y)$ とする。 (X, Y) より表される空間をデータ空間と呼ぶ。

形状推定に壁面反射波を利用するにあたり、各壁面に対して鏡像アンテナを想定する。アンテナから目標までの多重反射波は、対応する鏡像アンテナから目標までの直達波とほぼ等価であると考えられる。図 2 及び図 3 に本システムモデルで想定する鏡像アンテナを示す。アンテナ位置 $(x_i, y_i) = (i\Delta x + x_0, y_0)$ に対する鏡像アンテナ位置を

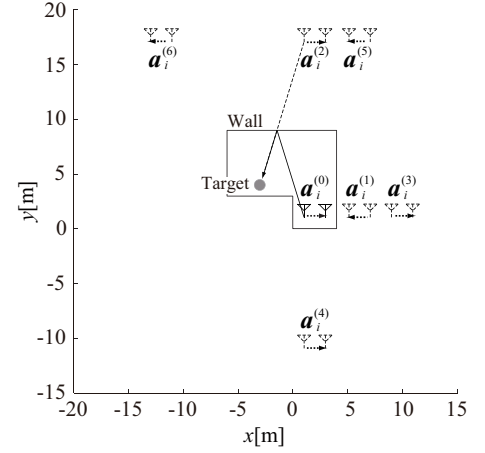


図 2 システムモデル A

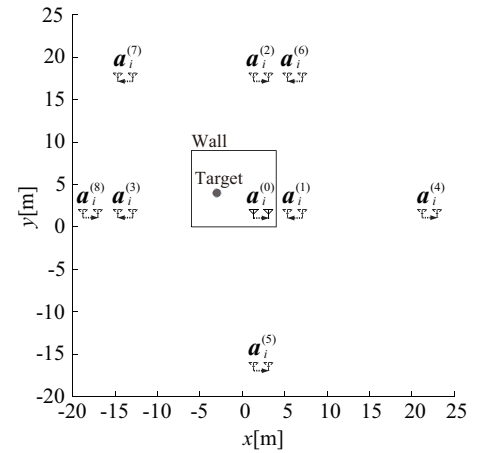


図 3 システムモデル B

$a_i^{(j)} = (x_i^{(j)}, y_i^{(j)}) = (i\Delta x^{(j)} + x_0^{(j)}, y_0^{(j)})$ ($i = 0, \dots, M; j = 0, \dots, N$) と表す。ここで、 M はアンテナの送受信点数、 N は想定する鏡像アンテナ数、 $\Delta x^{(j)}$ は j 番アンテナのサンプリング間隔である。ただし、 $j = 0$ のときは実アンテナを表すものとする。

3. 従来手法

3.1 SEABED 法

SEABED 法 [5] は実空間上の点 (x, y) とデータ空間上の点 (X, Y') との間に成り立つ可逆変換を利用した高速イメージング手法である。ただし、 $Y' = Y/2$ であり、 (X, Y') は整合フィルタ通過後の波形 $s(X, Y)$ より抽出される。 (X, Y') から (x, y) への逆境界散乱変換は次式で表される。

$$\begin{cases} x = X - Y' dY'/dX & (1) \\ y = Y' \sqrt{1 - (dY'/dX)^2} & (2) \end{cases}$$

ただし、 y は実数であるため、 $|dY'/dX| \leq 1$ が成り立つ。同手法は高精度なイメージングを実現することが知られているが、イメージングには目標からの直達波を用いるため、図 2 のように多重反射波の存在する環境下では利用できない。

図 3 に示すモデルに SEABED 法を適用して得られる推定像を図 4 に示す。半径 0.5 m, 中心 $(-3.0 \text{ m}, 4.0 \text{ m})$ の円形目標を

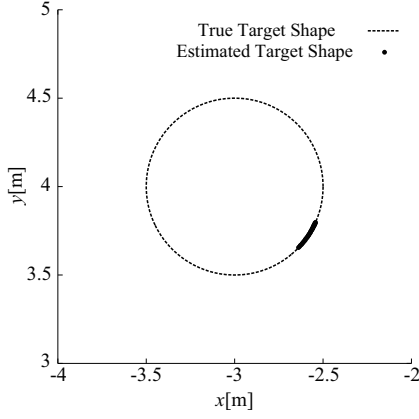


図4 SEABED法による推定像

想定し, $(x_0, y_0) = (0.1 \text{ m}, 1.0 \text{ m})$, $\Delta x = 0.1 \text{ m}$, $M = 38$ とする. 図4より, 目標境界が正しく推定されており, SEABED法により高精度なイメージングを実現することが分かる. しかし, 推定像は円の一部のみであり, 十分な推定領域が確保できていないことが確認できる.

3.2 時間逆転法

時間逆転法 [6], [7] は受信アンテナで受信された波形を計算機で逆伝搬計算することにより, 目標形状を推定する手法である. 影領域イメージングに拡張された時間逆転法の推定像 $I(r)$ は次式で表される.

$$I(r) = \sum_i^N \sum_{p=0}^N \sum_{q=0}^N H(\mathbf{a}_i^{(p)}, \mathbf{a}_i^{(q)}, r) \left| s'(X, |\mathbf{r} - \mathbf{a}_i^{(p)}| + |\mathbf{r} - \mathbf{a}_i^{(q)}|) \right|^2 \quad (3)$$

ここで, $H(\mathbf{a}_i^{(p)}, \mathbf{a}_i^{(q)}, r)$ は次式で定義される関数である.

$$H(\mathbf{a}_i^{(p)}, \mathbf{a}_i^{(q)}, r) = \begin{cases} 1 & (r \notin \Pi(\mathbf{a}_i^{(p)}) \cup \Pi(\mathbf{a}_i^{(q)})) \\ 0 & (r \in \Pi(\mathbf{a}_i^{(p)}) \cup \Pi(\mathbf{a}_i^{(q)})) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)において, $\Pi(\mathbf{a}_i^{(p)})$ は鏡像アンテナ $\mathbf{a}_i^{(p)}$ の影領域を表す. 式(3)は推定像 $I(r)$ が各アンテナから距離 r だけシフトした受信信号の振幅の総和で表されることを意味する. このとき, 影領域に相当するアンテナからの寄与は関数 $H(\mathbf{a}_i^{(p)}, \mathbf{a}_i^{(q)}, r)$ により除去される.

図2に示すモデルに時間逆転法を適用して得られる推定像を図5に示す. また, レイトレーシングにより得られる受信波形を図6に示す. 受信信号の観測時間は $0 \leq t \leq 150 \text{ nsec}$ とする. 使用する鏡像アンテナ数は $N = 6$ とし, これは壁面での反射回数が3回以下の反射波のみをイメージングに使用することに相当する. 図5より, 時間逆転法では目標の大まかな位置は推定できるが, 目標形状の推定は困難であることが分かる.

4. 提案手法

4.1 距離点抽出処理

本章では室内多重散乱環境を利用した影領域イメージング手法の手順を説明する. 4.1節では受信信号からの距離点抽出処

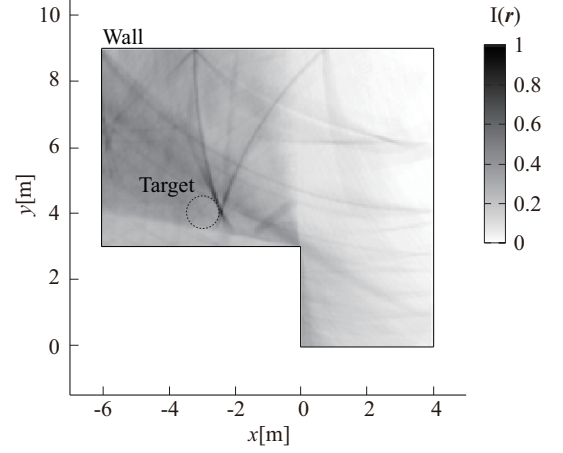


図5 時間逆転法による推定像

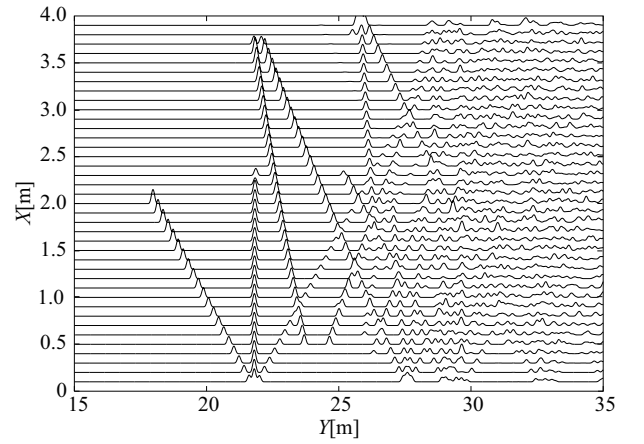


図6 整合フィルタ適用後の受信波形

理について説明する. 信号 $s(X, Y)$ より次式を満たす距離点 $(X_i, Y_{i,k})$ を抽出する.

$$\delta s(X, Y) / \delta Y = 0 \quad (5)$$

$$s(X, Y) \geq \rho \max s(X, Y) \quad (6)$$

ここで, X_i は i 番目の送受信位置, $Y_{i,k}$ はアンテナ位置 (X_i, y_0) での受信信号の k 番目のピーク値である. $\rho > 0$ は経験的に定まるパラメータである.

次に, 抽出した距離点を次式により距離点对として選択する.

$$|Y_{i,m} - Y_{i+1,n}| \leq T_0 \quad (7)$$

ここで, T_0 は送信パルスの空間長である. 距離点抽出処理の例を図7に示す. 同図に示す通り, 振幅の条件式(6)を満たさない弱い信号や式(7)の条件を満たさない孤立点は抽出されない. 図6より抽出した距離点对を図8に示す. ただし, 本稿では帯域幅 1.4 GHz の信号を想定しているため, $T_0 = 0.2 \text{ m}$ とし, $\rho = 0.55$ とする.

4.2 多重反射波を利用した干渉計法

4.2節では, 前節で抽出した距離点对を用いたイメージング手法について説明する. アンテナで受信された信号はモノスタティックレーダモデルとバイスタティックレーダモデルの2種類に分類することができる. 図9に各モデルの例を示す. 同左

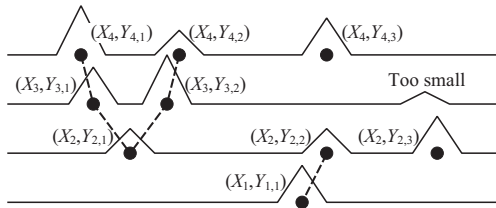


図 7 距離点抽出処理の例

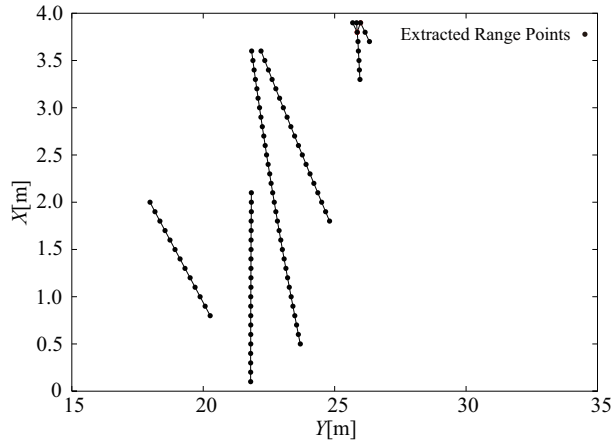


図 8 抽出距離点对

図のようにパルスの送信経路と受信経路が同一の場合，単一の鏡像アンテナによりパルスが送受信される等価的なモノスタティックシステムを構成していると考えることができる．一方，同右図のようにパルスの送信経路と受信経路が異なる場合，2つの鏡像アンテナによりパルスが送受信される等価的なバイスタティックシステムを構成していると考えることができる．

以上の分類を元に，本稿では干渉計法 [4] を用いて目標のイメージングを行う．干渉計法は2素子以上のアンテナで受信された信号の位相差より到来方向推定を行う手法である．この原理をもとに，本稿では目標推定点 $r_{i,(m,n)}^{(p,q)}$ を次の2つの楕円の交点により求める．

$$\begin{cases} |r - a_i^{(p)}| + |r - a_i^{(q)}| = Y_{i,m} & (8) \\ |r - a_{i+1}^{(p)}| + |r - a_{i+1}^{(q)}| = Y_{i+1,n} & (9) \end{cases}$$

同手法は受信信号の遅延時間差（距離差）より到来方向推定を行うことと等価である．同手法の概念図を図10に示す．モノスタティックレーダモデルの場合，式(8)，(9)は $p = q$ となり，推定点は円の交点により求められる．アンテナと距離点对の適切な組み合わせに対し，同手法を適用することで目標形状が推定できるが，これらの組み合わせを一意に決定することは困難である．本稿では同手法をアンテナと距離点对の想定しうる全ての組み合わせ (p, q) に対して適用する．室外に存在する推定点は虚像として除去する．

干渉計法により得られる推定像を図11に示す．同図より，目標境界は正しく推定されている一方で，室内全域に多数の虚像が推定されていることが分かる．これはアンテナと距離点对の誤った組み合わせに対しても干渉計法により推定像を求めることが原因である．

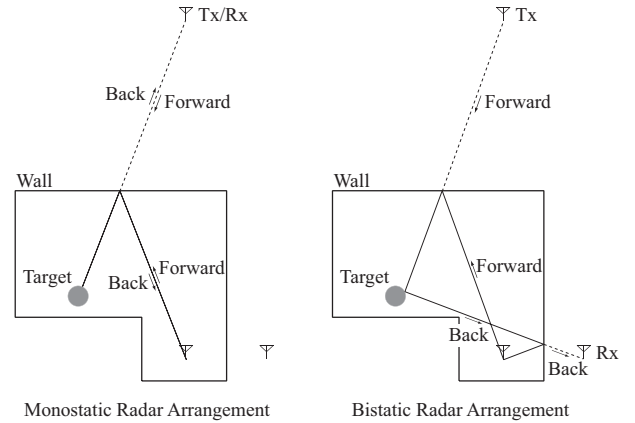


図 9 散乱経路による分類

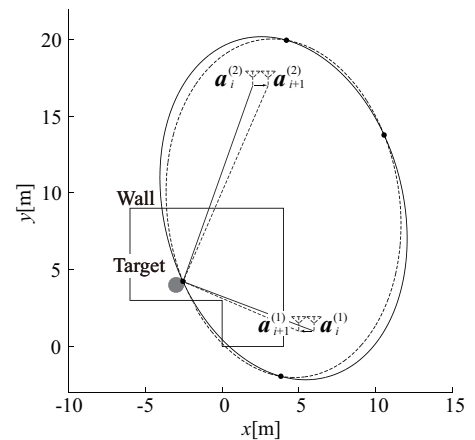


図 10 干渉計法の概念図

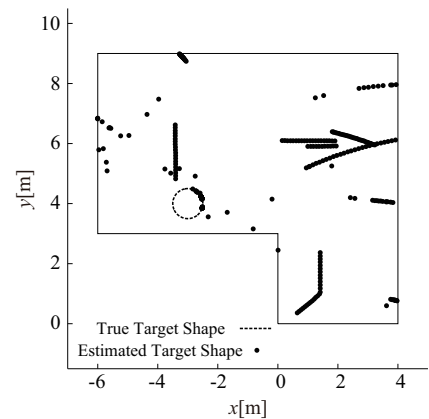


図 11 虚像除去手法適用前の推定像

4.3 時間逆転法を用いた虚像除去手法

前節での問題を解決するため，4.3節では時間逆転法を用いた虚像除去手法を提案する．まず，時間逆転法により得られる推定像より目標の大まかな位置を推定する．推定像が最大値となる点 r を $r_{\max} = \arg \max I(r)$ とする．提案手法ではデータ空間上での距離点对の傾きと時間逆転法より推定される傾きを利用して，鏡像アンテナと距離点对の大まかな組み合わせを推定する．前節で示した干渉計法において，次式の条件を付加する．

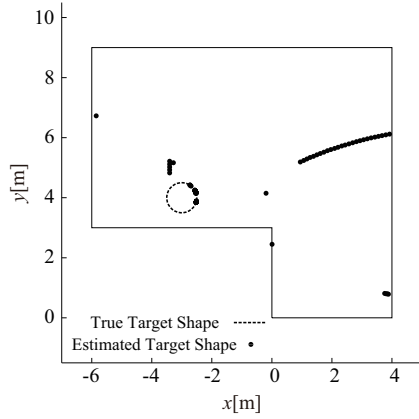


図 12 時間逆転法を用いた虚像除去後の推定像

$$\left| \tan \left(\frac{d(\mathbf{r}_{\max}, \mathbf{a}_{i+1}^{(p)}, \mathbf{a}_{i+1}^{(q)}) - d(\mathbf{r}_{\max}, \mathbf{a}_i^{(p)}, \mathbf{a}_i^{(q)})}{\Delta x} \right) - \tan \left(\frac{Y_{i+1,m} - Y_{i,n}}{\Delta x} \right) \right| \leq \varepsilon \quad (10)$$

$d(\mathbf{r}, \mathbf{a}_i^{(p)}, \mathbf{a}_i^{(q)})$ はアンテナ-推定点間距離であり、次式で定義される。

$$d(\mathbf{r}, \mathbf{a}_i^{(p)}, \mathbf{a}_i^{(q)}) = \left| \mathbf{r} - \mathbf{a}_i^{(p)} \right| + \left| \mathbf{r} - \mathbf{a}_i^{(q)} \right| \quad (11)$$

以上の操作より得られる推定像を図 12 に示す。ここで、経験的に $\varepsilon = \pi/36$ と定める。同図を図 11 と比較すると、室内の虚像が大幅に減少していることが分かる。

4.4 ドップラー効果を用いた虚像除去手法

前節で提案した虚像除去手法に加えて、目標が運動していることを利用して、本節ではドップラー効果を用いた虚像除去手法について提案する。まず、ドップラー速度を用いて受信信号から目標の速度ベクトルを推定する。ドップラー速度は STFT (Short-Time Fourier Transform) 等の時間周波数解析手法より推定できる。干渉計法により得られる推定点と鏡像アンテナとの対応は既知であるため、十分に S/N の高い 2 点の推定点 $\mathbf{r}_{i,(m,n)}^{(p,q)}$, $\mathbf{r}_{i,(m',n')}^{(p',q')}$ を用いて、次式の連立方程式を解くことにより目標の速度ベクトル \mathbf{v} を推定する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{v} \cdot \mathbf{i}_{i,(m,n)}^{(p,q)} = v_{i,m} \\ \mathbf{v} \cdot \mathbf{i}_{i,(m',n')}^{(p',q')} = v_{i,m'} \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{v} \cdot \mathbf{i}_{i,(m,n)}^{(p,q)} = v_{i,m} \\ \mathbf{v} \cdot \mathbf{i}_{i,(m',n')}^{(p',q')} = v_{i,m'} \end{array} \right. \quad (13)$$

ここで、 $\mathbf{i}_{i,(m,n)}^{(p,q)}$ は p 番及び q 番鏡像アンテナから推定点 $\mathbf{r}_{i,(m,n)}^{(p,q)}$ までの単位視線方向ベクトル、 $v_{i,m}$ はピーク値 $(X_i, Y_{i,m})$ の受信パルスより推定されるドップラー速度である。式 (12), (13) より推定した速度ベクトル \mathbf{v}_e を用いて、次式を満たす推定点 $\mathbf{r}_{i,(m,n)}^{(p,q)}$ を真の推定点とみなす。

$$\left| \mathbf{v}_e \cdot \mathbf{i}_{i,(m,n)}^{(p,q)} - v_{i,m} \right| < \eta |\mathbf{v}_e| \quad (14)$$

$\eta > 0$ は経験的に定まるパラメータである。式 (14) は、受信信号から得られるドップラー速度がおおよそその推定目標位置から求まる視線方向ドップラー速度と矛盾を生じない推定点のみを真の推定点とみなすことに相当する。

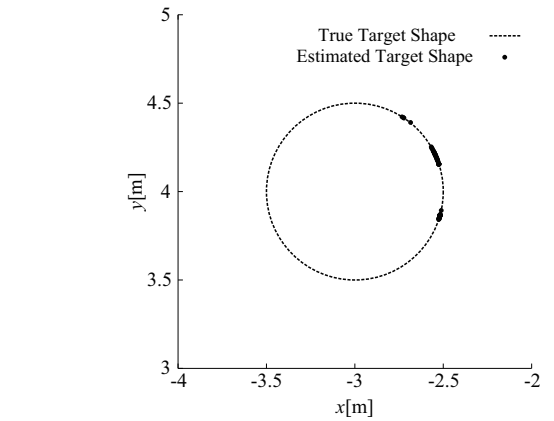
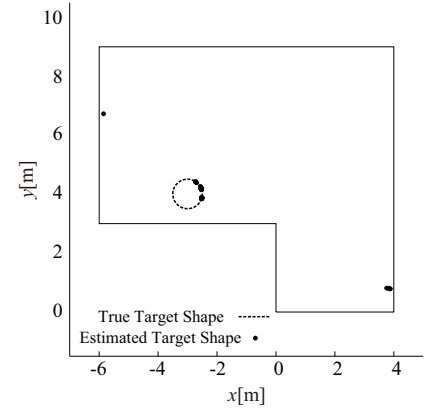


図 13 時間逆転法及びドップラー効果を用いた虚像除去後のシステムモデル A における推定像

以上の操作を図 2 に示すモデルに適用し、得られる推定像を図 13 に示す。目標の持つ速度ベクトルは $(0.50 \text{ m/s}, 0.87 \text{ m/s})$ とする。式 (12), (13) より推定された速度ベクトルは $(0.50 \text{ m/s}, 0.87 \text{ m/s})$ であり、速度推定に用いる推定点は図 12 の推定点のうち、 $\rho > 0.7$ を満たす $(X_i, Y_{i,m})$ より推定されるものとする。また、式 (14) において、 $\eta = 0.1$ とする。同図より、室内の多数の虚像が除去され、目標形状が高精度に推定されていることが分かる。この時の RMS 誤差は 0.35 m である。ただし、 $(-6 \text{ m}, 7 \text{ m})$ 及び $(4 \text{ m}, 1 \text{ m})$ 付近に推定される虚像を誤差計算から除く場合、RMS 誤差はほぼ 0 となり、提案手法により正確な推定が実現していることが分かる。

4.5 直接反射波到来時間を利用した虚像除去手法

影領域の存在しないモデルでは、多重散乱を介さない直接反射波及び第二波のピーク値 $(X_i, Y_{i,1})$, $(X_i, Y_{i,2})$ より手前のレンジには目標は存在しない。このことを利用して、次式を満たす推定点 $\mathbf{r}_{i,(m,n)}^{(p,q)}$ を虚像として除去する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \mathbf{r}_{i,(m,n)}^{(p,q)} - \mathbf{a}_i^{(p')} \right| < Y_{i,1}/2 \\ \left| \mathbf{r}_{i,(m,n)}^{(p,q)} - \mathbf{a}_i^{(p')} \right| + \left| \mathbf{r}_{i,(m,n)}^{(p,q)} - \mathbf{a}_i^{(q')} \right| < Y_{i,2} \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \mathbf{r}_{i,(m,n)}^{(p,q)} - \mathbf{a}_i^{(p')} \right| < Y_{i,1}/2 \\ \left| \mathbf{r}_{i,(m,n)}^{(p,q)} - \mathbf{a}_i^{(p')} \right| + \left| \mathbf{r}_{i,(m,n)}^{(p,q)} - \mathbf{a}_i^{(q')} \right| < Y_{i,2} \end{array} \right. \quad (16)$$

以上の操作を図 3 に示すモデルに適用し、得られる推定像を図 14 に示す。同図を図 4 と比較すると、一部に虚像が推定されている一方、推定領域が拡大していることが分かる。このように影領域が存在しない室内においては、目標の広い範囲を正確に形状推定することができる。

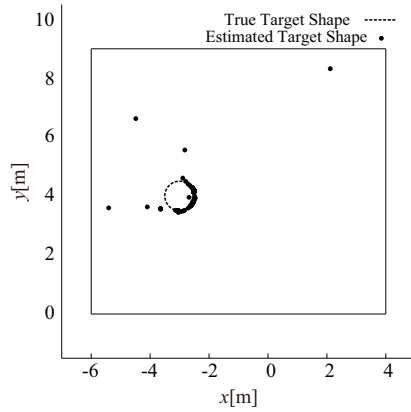


図 14 時間逆転法，ドップラー効果及び直接反射波到来時間を用いた虚像除去後のシステムモデル B における推定像

5. 提案手法の雑音耐性

本章では実環境下での提案手法の推定精度の評価を行う。本稿では，正規乱数によりモデル化した白色雑音を受信波形 $s'(X, Y)$ に加算することで雑音環境を実現する。S/N を受信信号の整合フィルタ適用後の最大ピーク電力値と整合フィルタ適用後の雑音の平均電力の比と定義する。

S/N = 30.6 dB のとき，提案手法による推定速度ベクトルは (0.19 m/s, -0.17 m/s)，推定像の RMS 誤差は 34.4 mm となり，速度推定の大きな誤差が推定像の RMS 誤差を悪化させていることが分かる。S/N = 55.6 dB のときに得られる推定像を図 15 に示す。このときの推定速度ベクトルは (0.60 m/s, 0.39 m/s) であり，RMS 誤差は 11.1 mm である。同図より，真の推定像の一部も虚像として除去され推定領域が縮小する一方で，目標境界上に推定点がほぼ正しく推定されていることが分かる。

6. ま と め

本稿では走査型単一アンテナを用いた影領域における運動目標のイメージング手法を提案した。まず，従来手法では影領域に存在する目標の十分な推定を実現しないことを示した。提案手法では，壁面に対して想定される鏡像アンテナに対し干渉計法を適用することで解像度の高い推定を実現した。同時に推定される虚像の除去手法として時間逆転法及びドップラー効果を利用した手法を提案し，室内の多数の虚像除去が可能であるこ

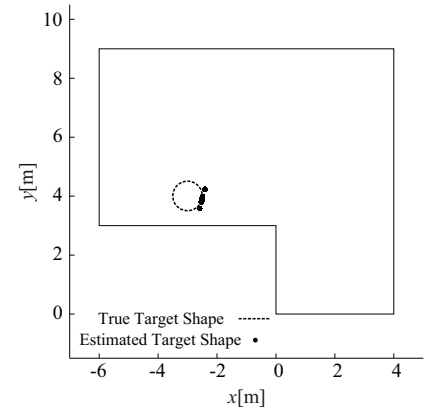


図 15 S/N = 55.6 dB のときのシステムモデル A における推定像

とを示した。雑音環境下での特性評価では，S/N が 55 dB 以上であれば提案手法による正しい推定が可能であることを示した。速度推定精度の向上及び雑音耐性の高いイメージング手法の開発を今後の課題とする。

文 献

- [1] S. Ikeda, H. Tsuji, and T. Ohtsuki, "Indoor event detection with Eigenvector spanning signal subspace for home or office security," IEICE Trans. Commun., vol. E92-B, pp. 2406–2412, 2009.
- [2] T. Sakamoto and T. Sato, "A method of estimating a room shape with a single antenna in a multipath environment," 4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2010, pp. 12–16, 2010.
- [3] 北村義之, 阪本卓也, 佐藤亨, "凸形状壁面を持つ室内における単一アンテナによる UWB レーダイメージング," 電子情報通信学会総合大会, C-1-7, 2010.
- [4] D. Massonet and K. L. Feigl, "Radar interferometry and its applications to changes in Earth's surface," Rev. Geophys., vol. 36, no. 4, pp. 441–500, 1998.
- [5] T. Sakamoto, "A fast algorithm for 3-D imaging with UWB pulse radar systems," IEICE Trans. Commun., vol. E90-B, pp. 636–644, 2007.
- [6] E. A. Marengo and F. K. Gruber, "Subspace-based localization and inverse scattering of multiple scattering point targets," EURASIP J. Appl. Signal Process., vol. 2007, pp. 192–192, 2007.
- [7] Y. Jin and J. M. E. Moura, "Time-reversal detection using antenna arrays," IEEE Trans. Signal Process., vol. 57, pp. 1396–1414, 2009.