

少数アンテナを用いた三次元運動目標 UWB レーダイメージング

松木 優治[†] 阪本 卓也[†] 佐藤 亨[†]

[†] 京都大学大学院情報学研究科

E-mail: kyoto.yuuji@technology05.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

あらまし 高精度なセキュリティシステムの構築に, UWB(Ultra Wide-Band) パルスレーダを用いた画像化技術が有望視されている. すでに同レーダを用いた様々な画像化法が提案されているが, 従来のアンテナシステムはいずれも大規模なアレイアンテナやアンテナの走査を必要とし, セキュリティシステムとして用いるには高コストで非現実的であった. この問題を解決するため, 我々はアンテナ走査の代わりに固定された少数アンテナで目標運動を推定し, その運動を補償することにより目標形状を得る手法を開発してきた. 本稿では 2 次元問題のみを対象としている従来手法を拡張し, 5 アンテナを用いて 3 次元問題にも適用可能な運動目標イメージング手法を提案する. さらに数値実験を用いて提案手法の特性を評価する.

キーワード UWB パルスレーダ, 高速立体形状推定, SEABED 法, 少数アンテナ

A 3D imaging algorithm of a moving target using a UWB radar with a small number of antennas

Yuji MATSUKI[†], Takuya SAKAMOTO[†], and Toru SATO[†]

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University

E-mail: kyoto.yuuji@technology05.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

Abstract UWB (Ultra Wide-Band) pulse radar is a promising candidate for surveillance systems. Although a number of imaging methods have been proposed using the radar, those methods require systems to scan antennas or to install a large number of antennas. Such systems are costly and unrealistic for surveillance systems. To overcome this problem, we proposed an UWB radar imaging algorithm that estimates unknown target shape based on target motion using only three fixed antennas. In this paper, we extend the 2D imaging algorithm to the 3D imaging algorithm that is applicable even for targets moving in horizontal and vertical direction. Some numerical simulations establish that the proposed method can accurately estimate the target shape even under various conditions.

Key words ultra wide-band, pulse radar, shape estimation, moving target, SEABED algorithm

1. はじめに

近年, 犯罪の多発や治安の悪化により, より高精度な監視システムの構築が急がれている. 従来の監視システムには一般に光学カメラが用いられてきたが, 暗い場所等の光が得られない環境での感度の低下及び形状等の目標に関する定量的情報の不足が問題となっている [1], [2].

こうした問題の解決には UWB(Ultra Wide-Band) パルスレーダが有望視されており, 同レーダを用いた高解像度イメージング法として様々な手法が提案されてきた. 従来のイメージング手法は波形情報を直接扱うために膨大な演算量を必要とし, リアルタイム性が求められる監視システムへの応用が困難であった [3] ~ [5]. そこで近年, SEABED (Shape Estimation Al-

gorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves) 法などエコーのレンジ情報だけに特化した信号処理法が開発されてきた [6] ~ [8]. これらの手法は目標が明瞭な境界を有するという条件のもとで目標を高速かつ高精度に画像化することが可能である.

しかし, これまでの手法はいずれもアレイアンテナやアンテナ走査を必要とし, 監視システムとして用いるには高コストであり非現実であった. このアンテナシステムの使用を避けるため, 我々はアンテナ走査の代わりに固定された少数アンテナのみで目標を画像化する手法を開発してきた. これらの画像化法は 2 次元問題を想定する. すなわち, 少数のアンテナを用いて水平に運動する人体の断面形状を推定することを目的とする. この形状推定には, まず目標の運動を推定し, 次に推定した運動を

補償することで各時刻に推定された散乱点位置を特定の時刻へ移動させる。3 アンテナを用いた場合、目標を円で近似することで目標の運動と形状を高精度に推定可能である [9], [10]。しかし、この手法が想定する運動は平行移動のみであるため、回転運動を伴う目標には適用できない。そのため阪本と佐藤 [11] はアンテナ数を 5 に増やすことで、回転を含む運動目標の画像化を可能にした。この手法は目標を楕円で近似する。その楕円中心の運動を用いて目標の平行移動を、楕円軸の回転を用いて目標の回転角を推定することで目標形状を画像化する。

しかし、これらの手法はいずれも 2 次元問題を想定しており、目標の垂直方向の変動を考慮していないため、実際に人体の運動を想定した場合には適用できない。この問題の解決のため、我々は従来手法を拡張して 3 次元問題にも適用可能とする。すなわち、目標の水平方向と垂直方向の運動を同時に推定したうえで、目標の全体形状を推定する手法を提案する。本稿では、まず提案法による画像化の手順を示し、次に数値計算を用いて提案法の特徴を評価する。

2. システムモデル

本稿では、図 1 に示すように、通路の壁に 5 系統のレーダが設置されている状況を想定する。図 2 にシステムモデルを示す。本稿では 3 次元問題を仮定する。人体形状を滑らかで明瞭な境界を有する凸形状目標でモデル化する。目標上の任意の 1 点を選んで基準点とし、各時刻におけるその位置 $X_m(t) = (X_m(t), Y_m(t), Z_m(t))$ は未知の任意運動を仮定する。また目標に回転は伴わないとする。通路の壁に相当する xz 平面上に 5 アンテナを等間隔 Δx で十字型に配置する。アンテナ #1 ~ #5 の位置はそれぞれ $(-\Delta x, 0, 0)$, $(0, 0, 0)$, $(\Delta x, 0, 0)$, $(0, 0, \Delta x)$, $(0, 0, -\Delta x)$ とする。各アンテナは送受信兼用の無指向性とし、それぞれモノスタティックレーダを構成する。ただし、各レーダ信号は干渉しないものとする。このためには、例えばパルス繰り返し周期を長くする方法や、直交符号を用いてパルス圧縮する方法が考えられる。各アンテナからそれぞれ一定時間間隔 Δt でパルスの送受信を繰り返すとする。サンプル点において、目標の散乱点と各アンテナとの間の距離を測定し、これを $R_i(t) (i = 1, 2, \dots, 5)$ とする。本稿の目的は、これらの測定データ $R_i(t) (i = 1, 2, \dots, 5)$ を用いて目標の運動 $X_m(t)$ と目標形状を推定することである。

3. 従来の画像化法

従来法は 2 次元問題を想定する。回転を伴わない目標を想定する場合、従来法はアンテナ #1, #2, #3 を用いて、目標の断面形状の画像化が可能である。ただし、これはシステムモデルにおいて、目標が z 軸方向に変化しないこと及び目標境界上の散乱点が常にアンテナベースラインを含む水平面上を推移することを前提とする。従来法は目標の運動推定のため、測定データ $R_i(t) (i = 1, 2, 3)$ を用いて目標を円で近似する。この近似円は目標の局所的な曲率に基づいて決定されるため、以下曲率円とよび、その中心、半径をそれぞれ曲率中心、曲率半径とよぶ。曲率中心 $c(t) = (c_x(t), c_y(t))$ 、曲率半径 $r(t)$ は以下の連立方程式を

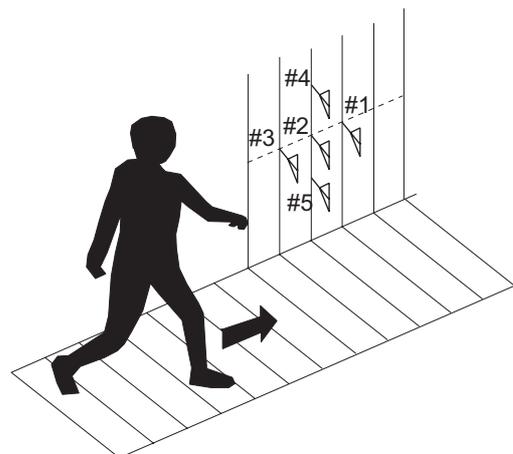


図 1 想定するレーダシステムにおけるアンテナ配置

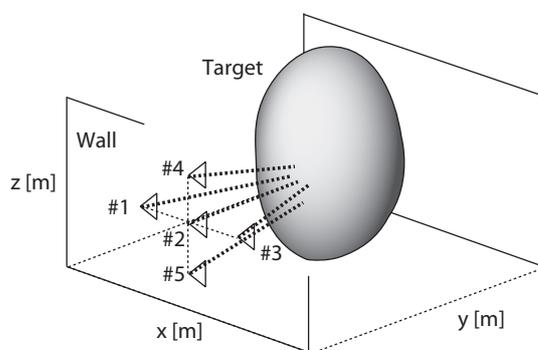


図 2 3次元のシステムモデル

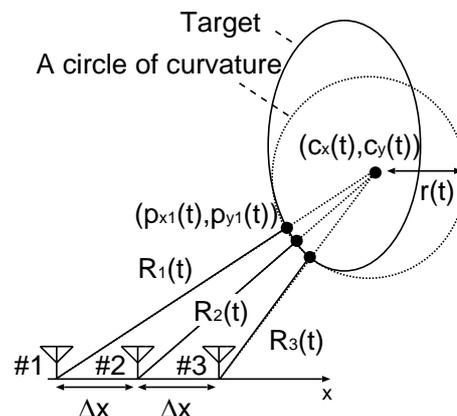


図 3 目標の局所的な曲率に基づく近似円

解いて求める。

$$\begin{cases} \sqrt{(c_x(t) + X_0)^2 + (c_y(t))^2} = R_1(t) + r(t) \\ \sqrt{(c_x(t))^2 + (c_y(t))^2} = R_2(t) + r(t) \\ \sqrt{(c_x(t) - X_0)^2 + (c_y(t))^2} = R_3(t) + r(t) \end{cases} \quad (1)$$

これらの変数の対応を図 3 に示す。こうして求めた $c(t)$ は目標の運動 $X_m(t)$ のみでなく、目標の表面に沿った散乱点の運動にも影響を受けるため、曲率中心の運動で目標の運動を近似することはできない。

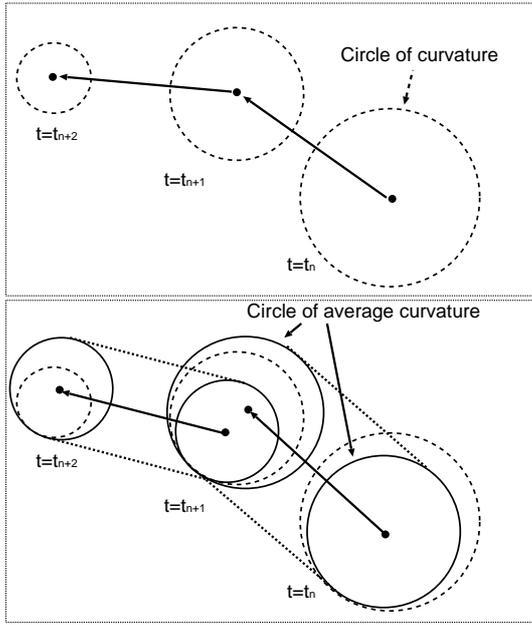


図 4 隣り合うサンプル点において曲率半径平均化を行わない場合と行う場合

この影響を取り除くため、従来法はまず $r(t_n)$ と $r(t_{n+1})$ を平均化した円半径 $\bar{r}_{n+\frac{1}{2}} = (r(t_n) + r(t_{n+1}))/2$ を計算する。次に曲率半径が $\bar{r}_{n+\frac{1}{2}}$ に等しいとして $c(t_n)$, $c(t_{n+1})$ を再計算する。この計算には散乱点の近似値 $p_i(t) = (p_{xi}(t), p_{yi}(t))(i = 1, 2, 3)$ を用いる。散乱点の近似値は図 3 の通り、曲率円のパラメータ $(c_x(t), c_y(t), r(t))$ を用いて容易に計算可能である。これらの散乱点の近似値 $p_i(t_n), p_i(t_{n+1})(i = 1, 2, 3)$ と曲率半径 $\bar{r}_{n+\frac{1}{2}}$ をもつ円の y 軸方向の差が最小となるように $\bar{c}(t_n)$, $\bar{c}(t_{n+1})$ を決定する。こうして求めた $\bar{c}(t_n)$, $\bar{c}(t_{n+1})$ を用いて、サンプル点間の運動を速度ベクトルで $v_{n+\frac{1}{2}} = (\bar{c}(t_{n+1}) - \bar{c}(t_n))/\Delta t$ と定義する。このサンプル点間の半径平均化の処理を行わない場合と行う場合をそれぞれ図 4 の上図、下図に示す。点線の円は $t = t_n, t_{n+1}, t_{n+2}$ のときの曲率円を示す。実線の円は $t = t_n, t_{n+1}$, $t = t_{n+1}, t_{n+2}$ で平均化された曲率円を示す。円中心からもう一方の円中心への矢印は、サンプル点間の運動を表す速度ベクトルを示す。結局、図 4 下図の矢印のように表される速度ベクトルを以下の通り積分することにより目標位置 $\bar{X}_m(t)$ を得る。

$$\bar{X}_m(t_{N+\frac{1}{2}}) = \sum_{n=1}^N v_{n+\frac{1}{2}} \Delta t \quad (2)$$

最後にこうして推定した目標運動で散乱点の近似値 $p_i(t)(i = 1, 2, 3)$ を補償し目標形状を得る。この散乱点の近似値は事前に計算されているため、再計算する必要はない。以上の手続きにより、目標の断面形状の画像化が可能となる。しかし、この従来手法は目標の垂直方向の変動を考慮していないため、実際の人体の運動を想定した場合には目標の画像化は不可能である。

4. 提案する画像化法

提案法はアンテナ 2 の上下にアンテナを配置し、計 5 つの測

定データを用いることで、目標を回転楕円体で近似する。回転楕円体とは楕円体の 3 軸のうち 2 軸の長さが等しいものをいう。これを用いる理由は、人のように縦に長い形状を目標とする場合、水平面においては円、垂直面においては楕円での近似が適切と考えられるからである。回転楕円体は以下の通り、中心 $s(t) = (s_x(t), s_y(t), s_z(t))$, 水平軸半径 $a(t)$, 垂直軸半径 $b(t)$ の 5 つのパラメータを用いて表される。

$$\frac{(x - s_x(t))^2}{a(t)^2} + \frac{(y - s_y(t))^2}{a(t)^2} + \frac{(z - s_z(t))^2}{b(t)^2} = 1 \quad (3)$$

これらのパラメータ $(s_x(t), s_y(t), s_z(t), a(t), b(t))$ を 5 アンテナの測定データ $R_i(t)(i = 1, 2, \dots, 5)$ を用いて求める場合、5 元連立非線形方程式を解く必要がある。この計算には連立非線形方程式の求根アルゴリズムとして知られる Brent の方法 [12] を用いる。この方法を用いることで回転楕円体パラメータの高精度な近似解を求めることが可能となる。運動推定は $s(t)$ を用いて行うが、3 節での説明と同様の理由から、この運動を用いた目標運動の近似は不可能である。提案法は水平軸半径、垂直軸半径をサンプル点間において $\bar{a}_{n+\frac{1}{2}} = (a(t_n) + a(t_{n+1}))/2$, $\bar{b}_{n+\frac{1}{2}} = (b(t_n) + b(t_{n+1}))/2$ で一定とする。計算した水平軸半径、垂直軸半径に基づき、回転楕円体中心を再計算して $\bar{s}(t_n)$, $\bar{s}(t_{n+1})$ とする。この計算には散乱点の近似値 $p_i(t) = (p_{xi}(t), p_{yi}(t), p_{zi}(t))(i = 1, 2, \dots, 5)$ の値を用いる。この散乱点の近似値は、事前に計算した回転楕円体パラメータから計算可能である。こうして計算した散乱点の近似値 $p_i(t_n), p_i(t_{n+1})(i = 1, 2, \dots, 5)$ と、水平軸半径 $\bar{a}_{n+\frac{1}{2}}$, 垂直軸半径 $\bar{b}_{n+\frac{1}{2}}$ をもつ回転楕円体の法線方向の差が最小となるように $\bar{s}(t_n)$, $\bar{s}(t_{n+1})$ を決定する。こうして求めた $\bar{s}(t_n)$, $\bar{s}(t_{n+1})$ を用いてサンプル点間の速度ベクトルを $v_{n+\frac{1}{2}} = (\bar{s}(t_{n+1}) - \bar{s}(t_n))/\Delta t$ で定義する。以上の手続において水平軸半径、垂直軸半径平均化の処理を行わない場合と行う場合の速度ベクトルの違いを図 5 に示す。こうして求めた速度ベクトルを積分して目標位置を得る。最後に散乱点の近似値 $p_i(t)(i = 1, 2, \dots, 5)$ を推定した運動で補償して画像化する。

本稿では、最終的な目標形状の像を得るために虚像の除去を行う。虚像は孤立点であることが多いため、 Δd の範囲内に他の推定点が存在しない推定点を虚像とする。すなわち、以下の式を満たす i 番目の推定点 x_i を虚像として除去する。

$$\min_j |x_i - x_j| > \Delta d \quad (i \neq j). \quad (4)$$

この閾値 Δd は経験的に決定する。

5. 提案法の実験評価

5.1 目標が楕円体形状の場合の適用例

図 6 は楕円体形状の目標が z 軸方向の変動を伴いながら左方向へ移動する状況を示す。目標形状の真値として x 軸半径 $A = 0.15$ m, y 軸半径 $B = 0.25$ m, z 軸半径 $C = 0.85$ m の楕円体を仮定する。これらのパラメータは人体の大きさを想定して決定した。目標運動は $(X_m(t), Y_m(t), Z_m(t)) = (x_0 + v_x t, y_0, z_0 \sin(\omega t + \chi_0))$ を仮定する。ただし、 $x_0 = 2.0$ m, $v_x = -1.0$ m/sec, $y_0 = 1.0$

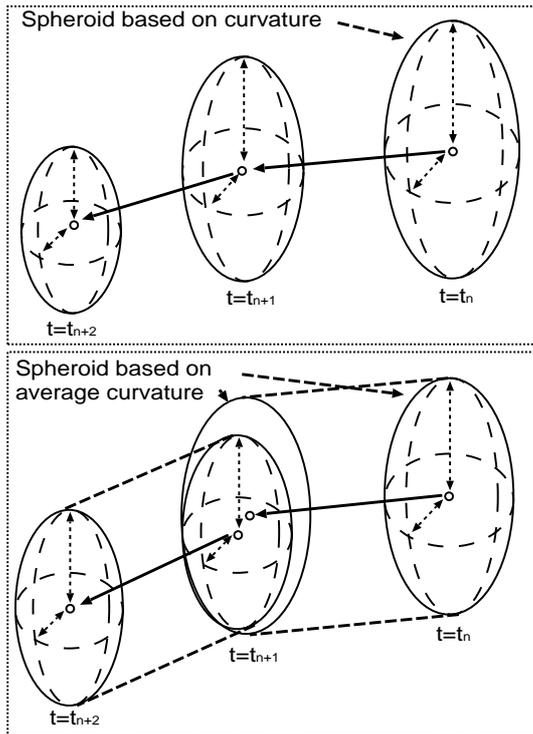


図5 隣り合うサンプル点において水平軸半径, 垂直軸半径平均化の処理を行わない場合と行う場合

m , $z_0 = 0.25$ m, $\omega = \pi/4$ rad/sec, $\chi_0 = \pi/2$ rad とする. アンテナ間隔は $\Delta x = 0.5$ m とする. この数値実験においては雑音のない環境を想定する. 本稿ではサンプル点間隔は $\Delta t = 4$ msec とし, 測定時間は -2 sec $\leq t \leq 2$ sec を仮定する. また本稿において虚像除去の閾値 Δd は 5.0 mm で一定とする.

提案法は測定データ $R_i(t) (i = 1, 2, \dots, 5)$ を用いてサンプル点ごとに目標を回転楕円体で近似する. 図7の破線と実線は, 真の目標形状と計算された回転楕円体をいくつかのサンプル点について示したものである. 同図より, 真の目標形状と計算された回転楕円体は一致しないことがわかる. これは, 楕円体形状目標の局所的な特徴から回転楕円体を決定しているため, 一般的に目標と回転楕円体は散乱点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. また同図の点は, 計算された散乱点の近似値を示す. 散乱点の近似値は目標境界に沿って決定されていることがわかる. この回転楕円体中心の運動を図8に点線1で示す. 提案法を用いない場合, 推定した運動軌道と真の運動軌道の RMS 誤差は 162.8 mm である. 次に, 提案法を用いて運動推定したものを図8に点線2で示す. 提案法を用いることにより推定運動の RMS 誤差は 162.8 mm から 21.5 mm へ改善された. 最後に図7で示した散乱点の近似値を, 提案法を用いて推定した運動に基づいて補償する. 図9はその推定形状を示す. 推定形状の精度評価においては, 推定点と真の形状の最短距離を誤差と定義する. この定義に基づいて推定形状と真の形状の RMS 誤差を計算すると 8.2 mm である. これは中心周波数 6.0GHz のパルスを想定した場合には約 0.2 波長に相当する. 提案法により目標形状が高精度に推定されていることがわかる.

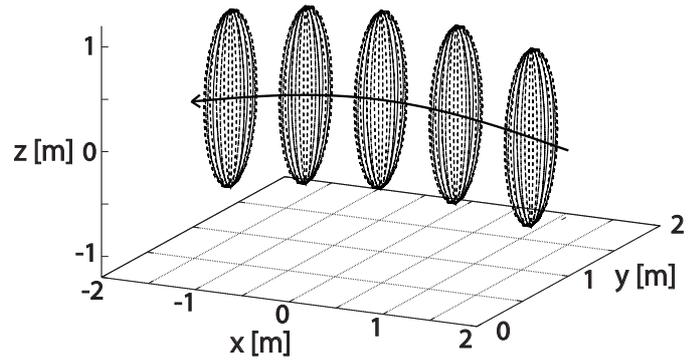


図6 想定する目標形状と運動

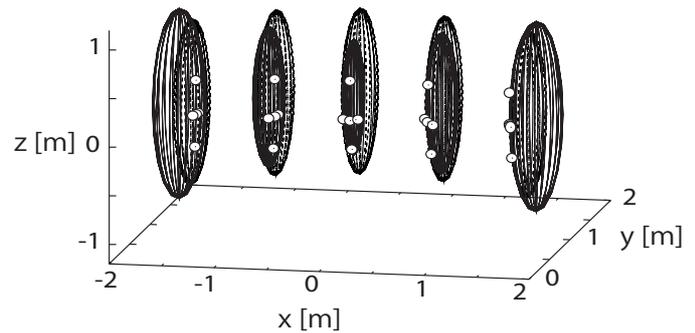


図7 目標を局所的に表現する回転楕円体と散乱点の近似値

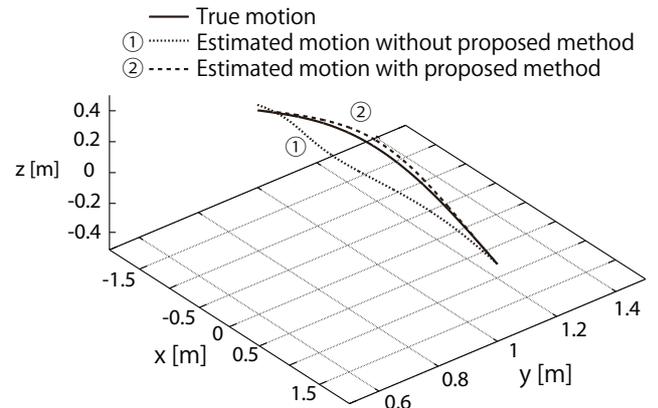


図8 運動推定例

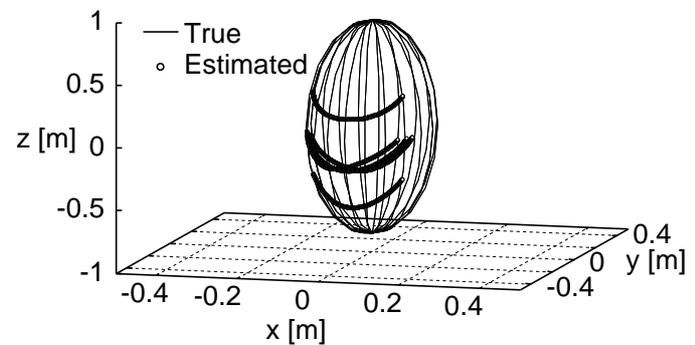


図9 提案法を用いた形状推定例

5.2 楕円体目標の形状と形状推定精度

次に, 楕円体形状目標の x 軸半径 A を 0.15 m から 0.5 m ままで 0.05 m ずつ変化させる. これは人体を想定した場合, 人体の

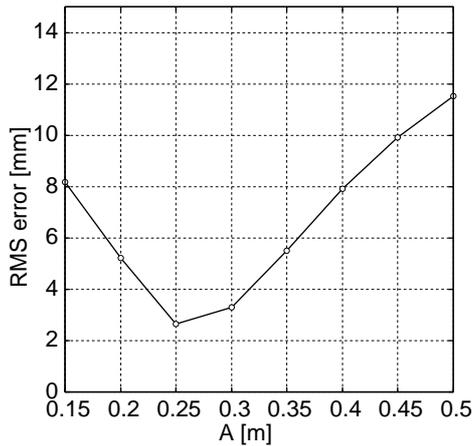


図 10 楕円体形状目標の x 軸半径 A と形状推定誤差

前面と背面の間の厚みを増加していくことに相当する。他のパラメータは前節と等しい値を用い、雑音のない環境を想定する。

楕円体の形状と形状推定誤差の関係を図 10 に示す。 $A = 0.25$ m のときに RMS 誤差は最小となる。これは $A = B$ が成り立つため、目標形状が回転楕円体となるからである。この場合、計算によって求めた近似形状としての回転楕円体が直接目標形状と一致しており、計算した回転楕円体中心は目標の真の位置と一致する。そのため、提案法で示した半径平均化の処理を必要とせず、運動推定誤差は最小となる。結果として形状推定誤差も最小となる。一方で楕円体形状目標の x 軸半径 A が 0.25 m から離れるほど形状推定誤差は大きくなる。これは提案法が目標を回転楕円体で近似することで運動推定を行うからである。そのため目標形状が回転楕円体から離れるほど運動推定誤差及び形状推定誤差は増加する。ただし、本節で設定した目標の x 軸半径 A の範囲内においてはいずれも RMS 誤差は 11.5 mm 以内である。このことから現実的な人体の大きさの範囲内において、提案法は高精度に目標の運動と形状を推定可能であることがわかる。

5.3 目標の運動と形状推定精度

目標形状は x 軸半径 $A = 0.15$ m, y 軸半径 $B = 0.25$ m, z 軸半径 $C = 0.85$ m の楕円体とする。目標運動は $(X_m(t), Y_m(t), Z_m(t)) = (x_0 + v_x t, y_0, z_0 \sin(\omega t + \chi_0))$ を仮定する。ただし、 $x_0 = 2.0$ m, $v_x = -1.0$ m/sec, $y_0 = 1.0$ m, $\omega = \pi/2$ rad/sec, $\chi_0 = 0$ rad とし、垂直方向の振幅 z_0 を 0 m から 0.5 m まで 0.05 m ずつ変化させる。 z_0 の大きな値は、走る等の動作により人体目標が大きく上下に振動する場合を想定している。この数値実験においては、雑音のない環境を想定する。

図 11 に垂直方向の振幅 z_0 と形状推定誤差の関係を示す。 $z_0 = 0$ m と $z_0 = 0.5$ m のときの推定形状の RMS 誤差はそれぞれ 5.4 mm, 9.2 mm であり、垂直方向の変動が大きいほど、提案法を用いた形状推定誤差が大きいことがわかる。ただし、 z_0 が 0.5 m 以下の場合の推定形状の RMS 誤差はいずれも 9.6 mm 以下である。すなわち提案法は目標が垂直方向に大きく変動する場合であっても、高精度な形状推定が可能であることがわかる。

5.4 アンテナ間隔と形状推定精度

目標形状は前節と同様とする。運動は $(X_m(t), Y_m(t), Z_m(t)) =$

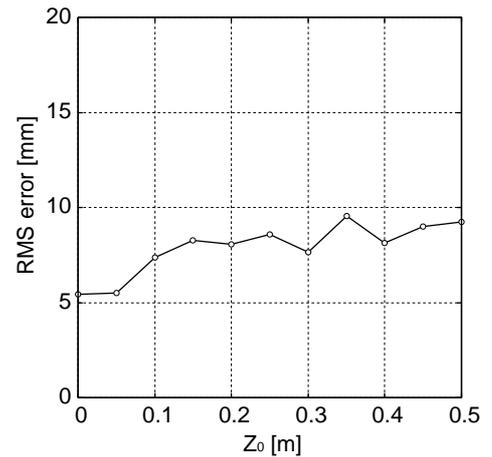


図 11 垂直方向への変動の大きさと形状推定誤差

$(x_0 + v_x t, y_0, z_0)$ を仮定し、 $x_0 = 2.0$ m, $v_x = -1.0$ m/sec, $y_0 = 1.0$ m, $z_0 = 1.0$ m とする。すなわち、目標が壁面と平行に等速直線運動する場合を想定する。アンテナ間隔 Δx を 0.1 m から 1.0 m まで 0.1 m ずつ変化させる。なお、雑音のない環境を想定する。

図 12 はアンテナ間隔と形状推定誤差の関係を示す。アンテナ間隔が大きくなるほど、形状推定誤差は大きくなるのがわかる。これはアンテナ間隔が大きいほど、各アンテナの散乱点が互いに離れていくことに起因する。提案法は目標境界上の散乱点を含む領域を回転楕円体で近似するため、散乱点が互いに離れた位置にあるほど、回転楕円体と目標境界は一致しなくなる。そのため運動推定誤差が増加し、結果として形状推定誤差が大きくなる。

この数値実験においては雑音のない環境を想定したが、雑音を加えた場合にはアンテナ間隔が小さいほどその影響が大きくなる点に注意が必要である。これはアンテナ間隔が小さいほど測定データ $R_i(t) (i = 1, 2, \dots, 5)$ の値が互いに近くなることに起因する。このため、わずかな雑音で回転楕円体のパラメータが大きく変動し、運動推定誤差が大きくなる。その結果として形状推定誤差が大きくなる。以上のことから雑音を含む実環境においては、想定される受信信号電力を考慮したうえで、適切な間隔でアンテナを配置する必要があることがわかる。

5.5 提案法の雑音耐性評価

目標形状及び運動は前節と等しいとし、アンテナ間隔 Δx を 0.5 m とする。こうして測定したデータ $R_i(t) (i = 1, 2, \dots, 5)$ に不規則成分を加算し提案手法の雑音耐性を検討する。加法的白色ガウス性雑音を仮定する。測定レンジ誤差の標準偏差と信号の S/N の関係は波形に依存するが、レイズドコサイン関数で変調されたモノサイクルパルスの場合は文献 [7] で検討されている。ここで S/N とは整合フィルタをかけた後のピーク信号電力と平均雑音電力の比とする。本節では受信信号の最低 S/N を 15 dB と想定し、アンテナと散乱点の間の距離に応じて S/N および不規則成分を計算する。最後にこの不規則成分を含む測定レンジデータを $\sigma = 0.01$ m のガウス関数にて平滑化して提案法を適用する。図 13 は推定形状を示し、この推定形状の RMS 誤

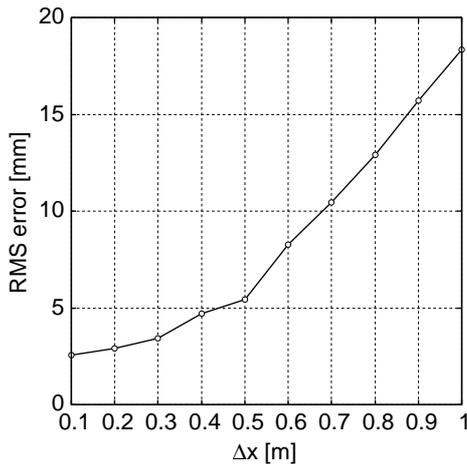


図 12 アンテナ間隔 Δx と形状推定誤差

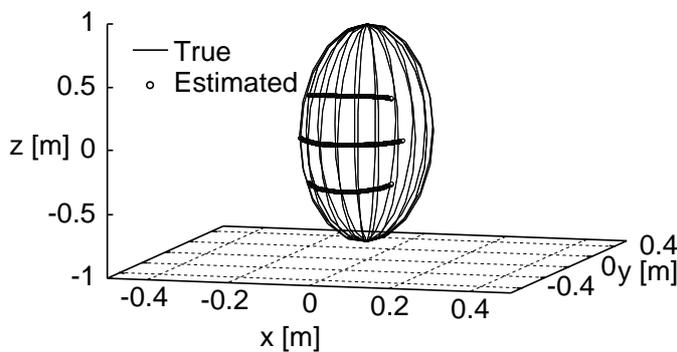


図 13 雑音環境下における提案法を用いた形状推定例

差は 6.7 mm である。すなわち提案法は雑音環境においても十分な精度で目標形状を画像化可能であることがわかる。ただし、同図は虚像を除去した結果であることに注意が必要である。同図中の推定点は S/N の高い受信信号から計算されたものであり、S/N の低い受信信号に基づく推定点は虚像として除去されている。

6. 結 論

本稿では監視システムへの応用を想定し、UWB レーダを用いた簡易なシステムの運動目標画像化手法を提案した。このシステムは固定された少数アンテナのみを用いることで低コスト化を実現する。固定された少数アンテナを用いて目標形状を画像化する方法はすでに開発されているが、いずれも 2 次元問題を想定していた。すなわち、目標が水平方向に運動すること及び目標の断面形状の推定を想定していた。これらの手法は、2 次元問題において目標の運動と形状の推定が可能であることを明らかにしたが、目標の垂直方向の変動を考慮していないため、実際の人体の運動を想定した場合には適用が困難であった。本稿では従来法を拡張し、目標の水平方向及び垂直方向の運動を推定したうえで目標形状の全体像を得る手法を提案した。提案法は回転楕円体モデルを使用し、回転楕円体の自由度と同じ 5 つのアンテナを利用したシステムを用いる。この回転楕円体の中心の運動から目標の運動を推定し、推定した運動で散乱点を補償することで目標形状を画像化する。数値実験により、目標形状が

回転楕円体ではなく楕円体の場合であっても、推定形状 RMS 誤差 8.2 mm という高精度な形状推定が可能であることがわかった。次に現実的な人体の大きさや運動を考慮して提案法を適用した場合も推定形状 RMS 誤差は 11.5 mm 以内であった。またアンテナ間隔の距離は想定される受信信号電力を考慮したうえで適切に決める必要があることがわかった。さらに最低 S/N が 15dB という現実的な雑音環境においても、提案法を用いて RMS 誤差 6.7 mm の精度で目標形状の画像化が可能であることがわかった。本稿で述べた提案手法は、固定された 5 アンテナという簡易なシステムで人体という 3 次元形状を画像化できるという点で、有効なアプローチであるといえる。雑音耐性向上手法の検討や、適切なアンテナ配置の検討、また非楕円体形状に対する形状推定精度の評価が今後の重要な課題である。

文 献

- [1] S.H. Seo, M.R.A-Sadjadi, and B. Tian, "A least-squares-based 2-D filtering scheme for stereo image compression," IEEE Trans. Image Process., vol. 9, no. 11, pp. 1967-1972, Nov. 2000.
- [2] V. Lippiello, B. Siciliano and L. Villani, "Position-based visual servoing in industrial multi-robot cells using a hybrid camera configuration," IEEE Trans. Robot., vol. 23, no. 1, pp. 73-86, Feb. 2007.
- [3] E.J. Bond, X. Li, S.C. Hagness, and B.D. van Veen, "Microwave imaging via space-time beam forming for early detection of breast cancer," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 51, no. 8, pp. 1690-1705, 2003.
- [4] J. van der Kruk, C.P.A. Wapenaar, J.T. Fokkema, and P.M. van den Berg, "Three-dimensional imaging of multi-component ground-penetrating radar data," Geophysics, vol. 68, no. 4, pp. 1241-1254, 2003.
- [5] R.M. Narayanan, X. Xu, and J.A. Henning, "Radar penetration imaging using ultra-wideband (UWB) random noise waveforms," IET Proc. Radar Sonar Navig., vol. 151, no. 3, pp. 143-148, 2004.
- [6] T. Sakamoto and T. Sato, "A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform," IEICE Trans. Commun., Vol. E87-B, No. 5, pp. 1357-1365, May 2004.
- [7] T. Sakamoto, "A 2-D image stabilization algorithm for UWB pulse radars with fractional boundary scattering transform," IEICE Trans. on Commun., vol. E90-B, no. 1, pp. 131-139, Jan. 2007.
- [8] 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, Mar. 2007.
- [9] T. Sakamoto, Y. Matsuki and T. Sato, "A Novel UWB Radar 2-D Imaging Method with a Small Number of Antennas for Targets with Arbitrary Shapes and Motion," 2009 IEEE International Conference on Ultra-WideBand (ICUWB2009), Vancouver, Canada, Sept. 2009. [PDF]
- [10] 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," 20th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECom 2010), Dubrovnik, Croatia, 20-23 Sep. 2010.
- [11] 阪本卓也, 佐藤亨, "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," 電磁界理論技術委員会, pp. 115-120, Nov. 2010.
- [12] R. P. Brent, "Algorithms for minimization without Derivatives," Prentice Hall, 1972.