

目標の運動を利用した 少数アンテナによる高精度 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
〒 606-8501 京都市左京区吉田本町
E-mail: matuki@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp

あらまし 新たな監視システムの構築に、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。我々はすでに境界散乱変換に基づく高速立体形状推定法として、SEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves) 法を提案している。しかし、SEABED 法は多様な場所での目標からの受信信号を用いるため、アレイアンテナやアンテナ走査が必要となり、監視システムとして用いるには、高コストで実用的でない。この問題を解決するため、アンテナを走査する代わりに目標の運動を用いて画像化する修正 SEABED 法が開発された。修正 SEABED 法は、未知運動を行う未知形状目標を 2 アンテナを用いたシステムで画像化する手法である。しかし、本手法は 2 アンテナのベースラインと目標の運動が平行であることを想定しているため、目標が任意運動する場合には画像化が不可能である。本研究では任意運動を行う目標の高精度イメージングを可能にするため修正 SEABED 法を拡張した新たな画像化法を提案する。

キーワード UWB パルスレーダ, 高速立体形状推定, 修正 SEABED 法

Accurate UWB radar imaging with a small number of antennas by using motion of a target

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

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

Abstract UWB (Ultra Wide-Band) pulse radar is a promising candidate for surveillance systems. The fast SEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves) imaging algorithm is deployed to apply UWB pulse radar in fields that require real time operations. Since this method requires antenna scanning, an alternate method named revised SEABED, which makes use of the motion of the target instead of scanning an antenna, was developed to reduce the number of antennas. The major limitation of the method is that the target is assumed to move on a line parallel to the antenna baseline. We propose a new UWB radar imaging algorithm that is applicable for targets with arbitrary motion.

Key words UWB pulse radar, fast shape estimation, revised SEABED algorithm

1. 序 論

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。従来は監視システムのデバイスとしては、一般にカメラが用いられてきた。カメラは、目標物体からの光の散乱反射を受光子で受け取るデバイスである。カメラを用いることにより、カメラの前を運動する目標を視認

することは容易である。しかし、目標までの正確な距離や、立体形状を定量的に推定することは困難である [1] ~ [5]。

こうした正確な距離推定や、立体形状のイメージングの実現には UWB(Ultra Wide-Band) パルスレーダが有望視されている [6] ~ [11]。UWB パルスレーダを用いたイメージング法として SEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves) 法が提案されてい

る [12]. SEABED 法は, 得られる画像が近似解でなく, 数学的に厳密な解となっており, しかも反復に基づかずに直接的に画像を得ることが可能である. このことから, 高速かつ高精度なレーダ画像化を実現できる.

SEABED 法は, 様々な場所での目標からの受信信号を用いるため, アレイアンテナやアンテナ走査が必要となる. こうしたアンテナシステムは, 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る. このシステムの使用を避けるため, 修正 SEABED 法が開発された [13]. 修正 SEABED 法は, アンテナ走査の代わりに目標の運動を利用して画像化する. この手法は 2 系統のレーダを用いて目標の運動と形状を推定するが, 目標がベースラインと平行に運動することを想定しているため, 任意運動目標には適用できない. これは, 実環境を想定した場合, 現実的ではない.

本稿では, 任意運動を行う目標の画像化法を提案する. まずは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実用性評価を行う.

2. システムモデル

本稿では, 図 1 に示すように, 通路の壁にレーダが設置されている状況を想定する. 歩行運動は未知関数とする. 図 2 にシステムモデルを示す. 簡単のために本稿では 2 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. アンテナ間距離 X_0 の 3 アンテナを仮定する. 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. それぞれ一定時間間隔でパルスの送受信を繰り返すとする. t_n はサンプル点, Δt をパルスの送受信間隔とする. すなわち, $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ とする. 各時刻において, 各アンテナから目標の散乱点までの距離を測定し, これを $R_1(t)$, $R_2(t)$, $R_3(t)$ とする. 本稿では, 受信信号からの遅延時間推定処理を行った後の, これらの各時刻における距離を観測データと呼ぶ. この距離推定については, 従来技術 [6] [7] にて検討されており, 本稿では詳しく説明しない. 目標は未知の任意運動を仮定する. アンテナ 1, 2, 3 の位置はそれぞれ $(-X_0, 0)$, $(0, 0)$, $(X_0, 0)$ とする. 目標上の任意の一点を選んで基準点とし, 各時刻におけるその位置を $(X(t), Y(t))$ とする.

3. 従来の画像化法

SEABED 法は, $Y(t) = \text{const.}$ と $X(t)$ が既知という条件下で, 目標の立体形状の高速イメージングを可能にする [12]. SEABED 法は, 目標の形状とパルスの伝播遅延の間に境界散乱変換 (Boundary Scattering Transform: BST), 逆境界散乱変換 (Inverse BST: IBST) と呼ばれる可逆な変換関係があることを利用する手法であり, 用いるアンテナは単一アンテナで十分である. ここで $R(t) = R_2(t)$ を定義する. $R(t)$ と, アンテナ位置の x 座標 $X(t)$, 目標の散乱点 $(x(t), y(t))$ は以下の IBST の式を満たす.

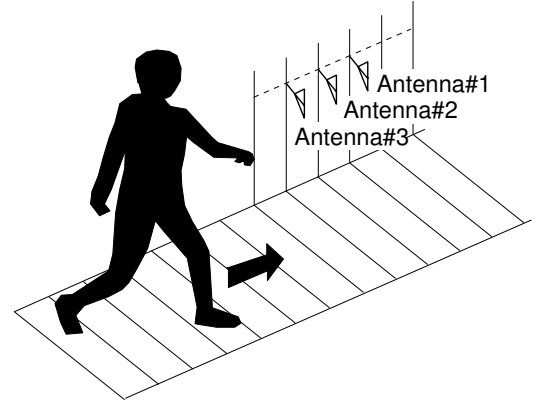


図 1 想定するレーダシステムにおけるアンテナ配置

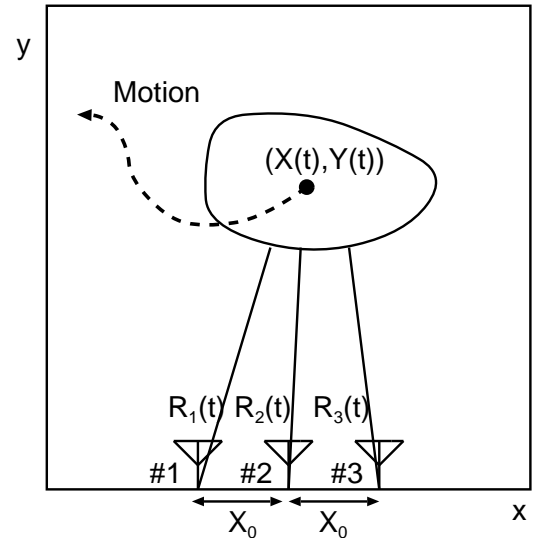


図 2 2次元のシステムモデル

$$\begin{cases} x(t) = -X(t) + R(t)(dR(t)/dX(t)) \\ y(t) = R(t)\sqrt{1 - (dR(t)/dX(t))^2} \end{cases} \quad (1)$$

IBST は各時刻における目標の位置 $X(t)$ に関する情報を必要とし, 目標の運動が既知でない限り画像化に本手法を用いることはできない.

従来の SEABED 法の制限を取り除くため, 修正 SEABED 法が開発された [13]. 修正 SEABED 法は, $Y(t) = \text{const.}$ という条件下で, 2 系統のレーダを用いて目標の運動 $X(t)$ を推定する. $X(t)$ を直接計算によって求めることができないのは, 図 3 の上図のように目標形状の表面に沿って散乱点が移動することによる. 図 3 の下図のように目標が点目標であれば目標の運動を直接計算により求めることが可能であるが, ある形状を有する目標がアンテナの近傍にある場合, 散乱点の移動を無視できない. そのため, SEABED 法を用いた目標の画像化の際は, 目標の運動とその表面に沿った散乱点の運動を区別した上で, 目標の運動を正しく推定することが必要となる.

例えば, $R_1(t)$, $R_2(t)$ の 2 アンテナを想定する. 修正 SEABED 法は以下の式を満足する連続関数 $\tau(t)$ を求める.

$$R_1(\tau(t)) = R_2(t) \quad (2)$$

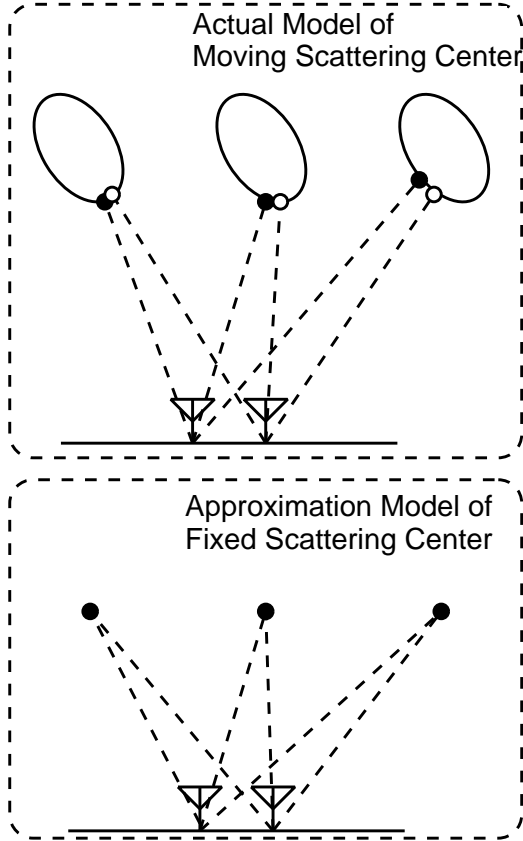


図3 実際の散乱点の運動と点目標を用いた近似

次に目標の運動 $X(t)$ を以下のように推定する．

$$X(t) \simeq \int \frac{-2X_0}{\tau(t) - \tau^{-1}(t)} dt \quad (3)$$

式 (3) で推定した $X(t)$ を従来の SEABED 法に適用することで画像化が可能となる． $Y(t) = \text{const.}$ という条件下での修正 SEABED 法の有効性は文献 [13] で示されている．しかし、この条件は目標が任意運動を行う実環境下においては現実的ではない．

本稿では任意運動する目標の画像化法を提案するが、その際に 3 アンテナを用いることの必要性を示す．2 アンテナのみを用いる場合、観測されるデータは $R_1(t)$ と $R_2(t)$ のみである．目標がある形状を有しアンテナ近傍を運動する場合、各アンテナの散乱点の位置は異なる．各アンテナから散乱点までの距離 $R_1(t), R_2(t)$ を半径とする円を描いたときの交点は、点目標を仮定したときの目標位置である．目標の任意運動を仮定する場合、真の目標と等価な点目標を 2 アンテナでは区別できない．ゆえに、任意運動する目標の画像化の際には少なくとも 3 アンテナが必要となる．

4. 提案する画像化法

従来の手法は $Y(t) = \text{const.}$ という非現実的な条件下での画像化法であった．本節では、3 アンテナを用いて任意運動する目標の画像化法を提案する．まず提案法は、3 アンテナから観測されるデータ $R_1(t), R_2(t), R_3(t)$ を用いて、曲率中心 $c(t) = (c_x(t), c_y(t))$ と曲率半径 $a(t)$ を以下の連立方程式を解

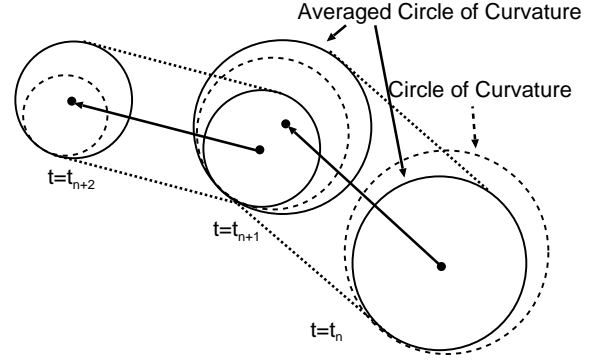


図4 提案法で用いる平均化した曲率円

いて求める．

$$\begin{cases} \sqrt{(c_x(t) + X_0)^2 + (c_y(t))^2} = R_1(t) + a(t) \\ \sqrt{(c_x(t))^2 + (c_y(t))^2} = R_2(t) + a(t) \\ \sqrt{(c_x(t) - X_0)^2 + (c_y(t))^2} = R_3(t) + a(t) \end{cases} \quad (4)$$

こうして求めた $c(t)$ は目標の運動 $\mathbf{X}(t) = (X(t), Y(t))$ 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．

この影響を取り除くため、提案法は、 $a(t_n)$ と $a(t_{n+1})$ を平均化した円半径 $\bar{a}_{n+\frac{1}{2}} = (a(t_n) + a(t_{n+1}))/2$ を計算する．曲率半径が $\bar{a}_{n+\frac{1}{2}}$ に等しいとして、最小二乗法を用いることにより $c(t_n), c(t_{n+1})$ を再計算し $\bar{c}(t_n), \bar{c}(t_{n+1})$ とする．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以下の通り定義する．

$$\mathbf{v}_{n+\frac{1}{2}} = (\bar{\mathbf{c}}_{n+1} - \bar{\mathbf{c}}_n) / \Delta t \quad (5)$$

曲率半径をサンプル点間において一定とすることで、目標の運動 $\mathbf{X}(t)$ と、曲率半径 $a(t)$ に影響する目標の散乱点の運動を分離することが可能となる．以上の手続きを図 4 に示す． $t = t_n, t_{n+1}, t_{n+2}$ のときの曲率円が点線で描かれている． $t = t_n, t_{n+1}, t = t_{n+1}, t_{n+2}$ で平均化された曲率円が実線で描かれている．サンプル点間の運動を表す速度ベクトルが、平均化された円中心からもう一方の円中心への矢印で表されている．

結局、サンプル点間の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 $\bar{\mathbf{X}}(t)$ を得る．

$$\bar{\mathbf{X}}(t_{N+\frac{1}{2}}) = \sum_{n=1}^N \mathbf{v}_{n+\frac{1}{2}} \Delta t \quad (6)$$

ここで、初期値の $\mathbf{X}(0)$ は画像化形状の位置に影響し、画像化形状には影響しないので問題とならない．この推定した目標運動 $\bar{\mathbf{X}}(t)$ を用いることで、任意運動する目標に対して SEABED 法を適用することが可能となる．

5. 提案法の実験評価

5.1 形状推定評価

本節では、数値計算を用いて提案法の実験評価をする．数値計算に用いるモデルを図 5 に示す．目標形状は一例として、 y 軸に対して $\phi = 30^\circ$ 主軸を傾けた、長軸 0.25m 短軸 0.15m の楕円筒と

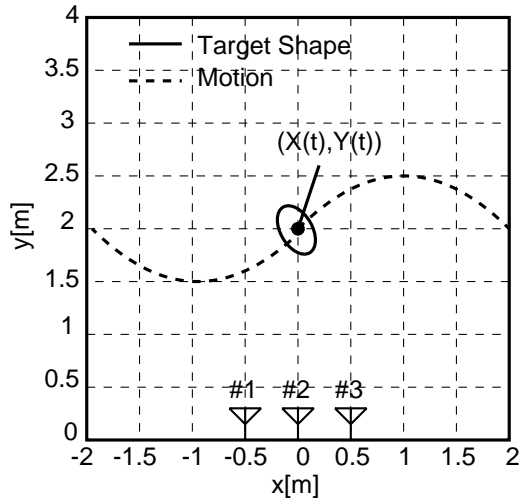


図5 数値計算に用いるシステムモデル

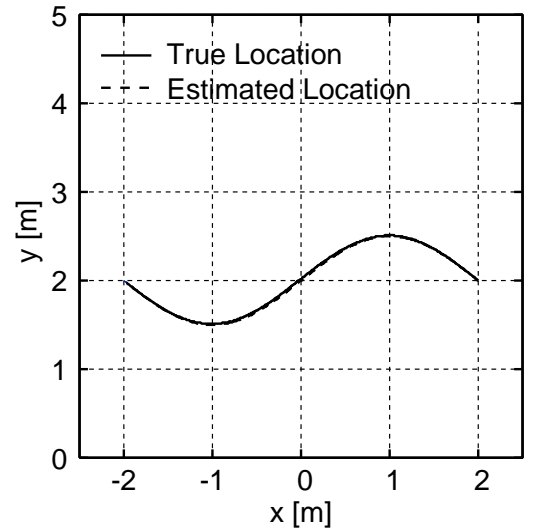


図7 提案法による目標運動推定例

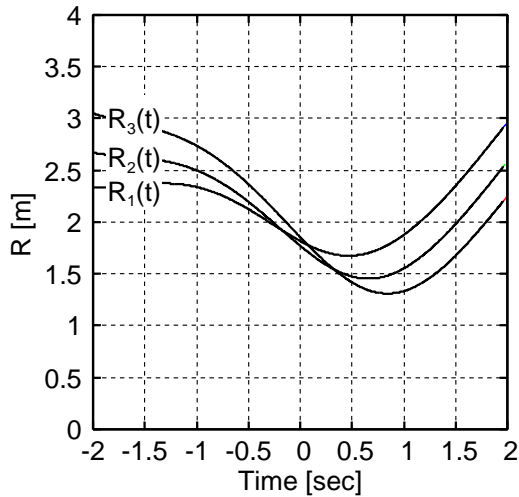


図6 $R_1(t), R_2(t), R_3(t)$ の観測データ

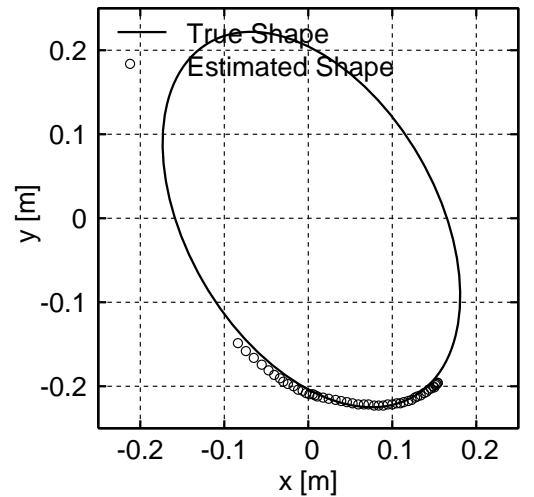


図8 提案法による画像化例

する．この楕円筒の大きさは，ほぼ人の胴体の大きさとなるように値を定めた． $(X(0), Y(0)) = (0\text{m}, 2\text{m})$ ， $X_0 = 0.5\text{m}$ とする．目標の運動は， $(X(t), Y(t)) = (v_x t, y_0 + y_f \sin \omega t)$ とし，ここでは $v_x = -1.0\text{m/sec}$ ， $y_0 = 2.0\text{m}$ ， $y_f = 0.5\text{m}$ ， $\omega = 1.0\text{rad/sec}$ とする．この条件は，図5において目標が右から左へ蛇行して運動する場合を想定する．測定時間は-2sec から 2sec とする．サンプリング間隔を 5msec とする．このときの観測データを図6に示す．雑音のない理想的な状況を想定する．

提案法による目標運動推定例を図7にしめす．真の目標の運動と推定する目標の運動がほぼ一致し，推定精度は高いことが分かる．提案法による目標形状の画像化例を図8に示す．RMS誤差は約 4.0mm で，これは楕円長軸に対して 1.6%，楕円短軸に対して 2.7%である．

5.2 雑音下での形状推定評価

前節で用いた数値計算モデルの観測データ $R_1(t), R_2(t), R_3(t)$ に雑音を加えたときの提案法の特性を評価する．本稿は，固定されたアンテナに対して目標が運動することを想定するため，パルスの送受信による S/N および推定 RMS 誤差は目標の運動に応じて変化する [14]．本節では，観測される S/N の最小値

を 15dB とする．図6で $R_3(t)$ が最大値をとるときの S/N を 15dB とし，各アンテナから散乱点までの距離に応じた S/N を計算により求める．本節で用いる数値計算モデルでは S/N は 15dB から 30dB までの値をとるが，ここで想定した S/N 比は十分現実的である [15]．中心周波数 6.0GHz のモノサイクルパルスを想定し，S/N に応じた推定 RMS 誤差を計算すると 0.18mm から 0.98mm までの値をとる [14]．各時刻で推定 RMS 誤差を標準偏差とする正規乱数を生成し， $R_1(t), R_2(t), R_3(t)$ に雑音として加える．

雑音を印加したときの提案法による目標運動推定例を図9に示す．目標の推定運動は大きな誤差を生じる．次に提案法による画像化例を図10に示す．推定される点はやはり大きな誤差を有する．

次に雑音を印加した $R_1(t), R_2(t), R_3(t)$ に平滑化処理を行う．次式のガウス関数との畳み込みによって信号の平滑化を行う．

$$g(x; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

ここで σ はガウス関数の形状を決定するパラメータであり相関

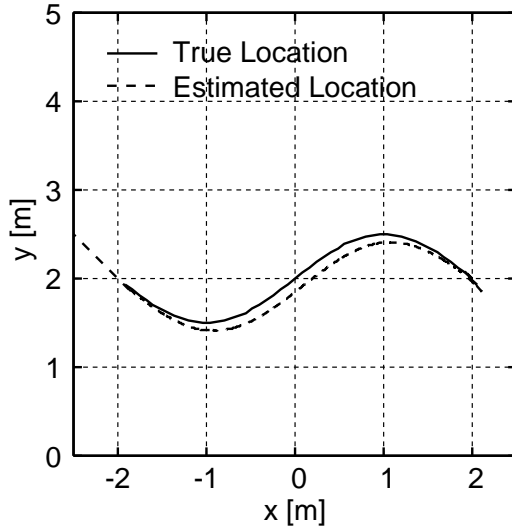


図 9 雑音印加時の提案法による目標運動推定例

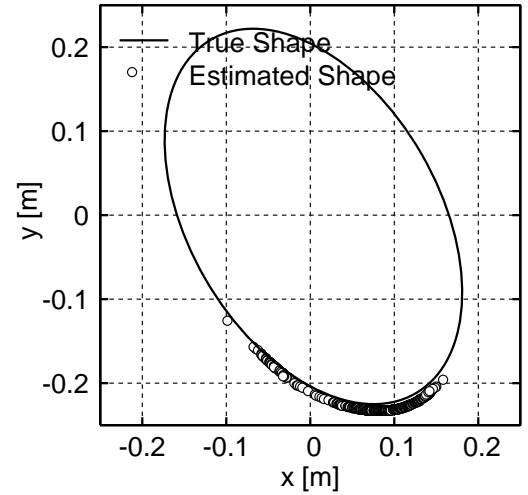


図 11 適応平滑化処理後の提案法による画像化例

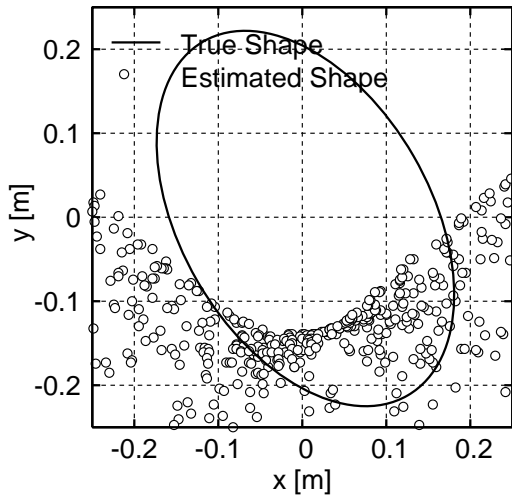


図 10 雑音印加時の提案法による画像化例

長と呼ばれる．同フィルタは白色性の誤差の平滑化に適しているが，非常常信号の平滑化は十分にできない．非常常信号の平滑化を十分に行うには，ガウシアンフィルタの相関長 σ を $R(t)$ の時間変化に応じて変化させる適応平滑化法が有効である [7]． σ は次式で求める．

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_{\max} R}{\pi}} \quad (8)$$

ただし， δ_{\max} はガウシアンフィルタを用いた平滑化により生じる $R(t)$ のひずみの許容値である．本稿では，この許容値を $0.1\lambda = 5\text{mm}$ とする．適応平滑化処理を行った $R_1(t), R_2(t), R_3(t)$ を用いて提案法により目標を画像化した例を図 11 に示す．このときの RMS 誤差は約 4.2mm である．雑音環境下でも，適切な雑音処理を行うことにより提案法の適用が可能となるのが分かる．

6. 考 察

隣り合うサンプル点における 2 つの曲率半径を平均化する必

要性について議論する．曲率中心の運動や曲率円周上の散乱点の近似値の運動を目標の運動 $X(t)$ とみなすことはできない．以下にこれらを用いた運動推定例と運動推定を誤る原因について述べる．

図 12 に曲率中心を目標の運動とみなして運動推定した例を示す．運動推定を誤るのは，3 アンテナから見た目標の曲率に応じて曲率中心が変化することによる．例えば，目標が x 軸に平行に直線運動している場合を想定する．このときの基準点の y 座標は一定であるのに対し，曲率中心は目標の曲率に応じて x 方向 y 方向に変化する．これは目標の運動とは異なるので曲率中心の運動を目標の運動とみなすことは不適切である．

図 13 に曲率円周上の散乱点の近似値の運動を目標の運動とみなして運動推定した例を示す．運動推定を誤るのは，目標が有限な形状をもつ場合，アンテナから送信されたパルスの散乱点が目標の運動に応じて目標上を移動していくことによる．例えば，目標上のある一点の運動が分かれば，それを目標の運動とみなすことができる．しかし，曲率円周上の散乱点の近似値は，目標の運動に伴い目標上を移動していくので，これを目標の運動とみなすことはできない．以上の通り，これらの単純な方法では目標の運動と散乱点の運動を区別できないため運動推定を誤る．よって任意運動目標の運動を推定するには本稿で提案した手法を用いることが必要となる．

7. 結 論

本稿では，主に監視システムへの応用のための UWB レーダを用いた高速イメージング手法を開発した．目標の運動を利用した目標形状画像化法として修正 SEABED 法が開発されたが，これは目標の運動を 2 系統のレーダのベースラインに平行な運動に限定していた．しかし本手法は 3 アンテナを用いることで任意運動目標の画像化が可能であることを示した．雑音環境下において，目標の形状を推定した際の RMS 誤差は 10mm 以内である．これは監視システムとして人体の形状を推定するのに十分な精度を有するといえる．本稿では雑音評価を数値計算の

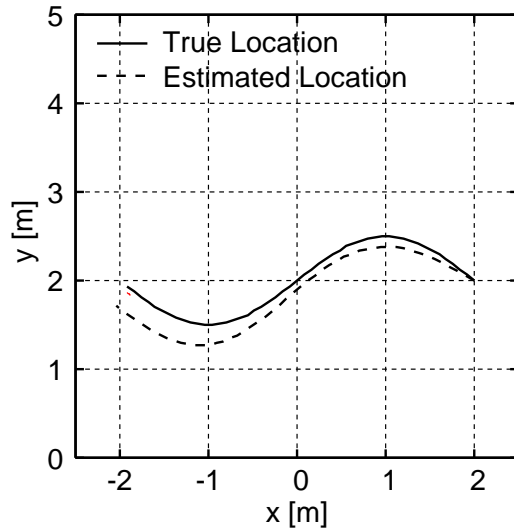


図 12 曲率中心の軌跡

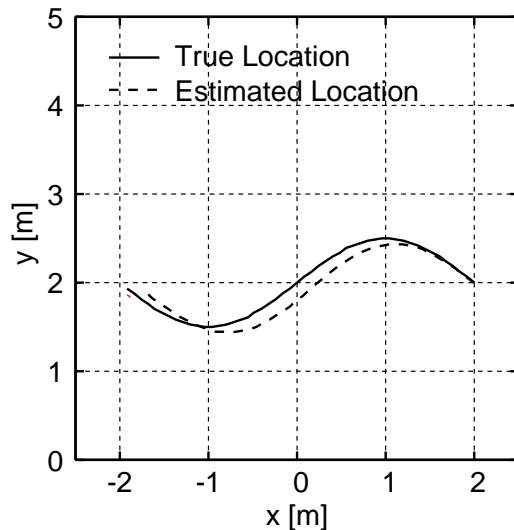


図 13 曲率円周上の散乱点近似値の軌跡

みで行ったため、実環境下において検証を行うことが課題である。また、目標が滑らかでない場合や、凹面のときなど、任意形状に対する画像化法の開発も今後の課題である。

文 献

- [1] M. Ogami, H. Ikeuchi, and H. Hanekura, "3-dimensional visualization handbook," Asakura Publishing Co., Ltd, vol. 1, pp. 33-71, Feb., 2006.
- [2] S.H. Seo, M.R.A-Sadjadi, and B. Tian, "A least-squares-based 2-D filtering scheme for stereo image compression," *IEICE Trans. Image Process.*, vol. 9, no. 11, pp. 1967-1972, Nov., 2008.
- [3] V. Lippiello, B. Siciliano and L. Villani, "Position-based visual servoing in industrial multirobot cells using a hybrid camera configuration," *IEICE Trans.Robot.*, vol. 23, no. 1, pp. 73-86, Feb., 2007.
- [4] L. Zhao, and C.E. Thorpe, "Stereo and neural network-based pedestrian detection," *IEICE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 1, no. 3, pp. 148-154, Sep., 2000.
- [5] W. van der Mark, and D.M. Gayrila, "Real-time dense stereo for intelligent vehicles," *IEICE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 38-50, Mar., 2006.
- [6] 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, Dec., 2005.
- [7] 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, Jan., 2007.
- [8] R.M. Narayanan, X. Xu, and J.A. Henning, "Radar penetration imaging using ultra-wideband (UWB) random noise waveforms," *IEEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, vol. 151, no. 3, pp. 143-148, 2004.
- [9] W.C. Chew, and Y.M. Wang, "Reconstruction of two dimensional permittivity distribution using the distorted Born iterative method," *IEEE Trans. Med. Imaging.*, vol. 9, no. 2, pp. 218-225, 1990.
- [10] E.J. Bond, X. Li, S.C. Hagness, and B.D. van Veen, "Microwave imaging via space-time beamforming for early detection of breast cancer," *IEICE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 8, pp. 1690-1705, 2003.
- [11] P. Lobel, C. Pichot, L. Blanc-Feraud, and M. Barlaud, "Microwave imaging; Reconstructions from experimental data using conjugate gradient and enhancement by edge-preserving regularization," *Int. J. Imaging Systems and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 337-342, Dec., 1998.
- [12] 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.
- [13] T. Sakamoto, and T. Sato, "2-Dimensional Imaging for Human Bodies with UWB Radar using Approximately Uniform Walking Motion along a Straight Line with SEABED Algorithm," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E91-B, no. 11, pp. 3695-3703, Nov., 2008.
- [14] T. Sakamoto, and T. Sato, "A 2-D Image Stabilization Algorithm for UWB Pulse Radars with Fractional Boundary Scattering Transform," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E90-B, no. 1, pp. 131-139, Jan., 2007.
- [15] 可児佑介, 阪本卓也, 佐藤亨, 井上謙一, 福田健志, 酒井啓之, "多点同時送信アレイを用いたスペクトル拡散 UWB レーダによる高速立体形状イメージング," 電子情報通信学会 2009 年総大会, B-2-14, 2009.