

# 近距離を対象とした複数アンテナ装置を用いた車載用レーダネットワークの開発

代表研究者 羽多野 裕 之 静岡大学 工学部 助教

## 1 背景

報告者は、自動車周囲・近距離に存在する障害物を検出するべく障害物検出システムの構築を行っている。遠距離に存在する対象物を検出するシステムは実用化に至っている一方で、近距離用は利便性が高いアプリケーションが多いのにも関わらず未だ研究段階である。近距離用障害物検出システムでは、広い視野角を有した監視領域と高い障害物位置推定精度が要求される。本研究では、これらの課題を達成するために複数のセンシングデバイスを車両前方に分散配置したレーダネットワークによる実現を検討してきた。複数のセンシングデバイスを用いたシステムのため、単体の測距装置で障害物の検出を行う従来のシステムと比べ高い検出信頼性が期待できる。これにより、歩行者などの衝突回避システムや死角補助システムなどの幅広いアプリケーションに適応可能となる。

報告者はレーダネットワークを用いて正確な位置推定と確かな検出能力を実現するために、4つのアプローチを行った。まず、①送信アンテナのアレイ化の検討を行った。これは、送信アンテナをアレイ化し電子的に指向性を制御することを目的としている。これを通じて、放射可能距離の延長を目指すものである。また、広い視野角が達成できるような指向性の形成を目指す。これらアレイ化を行うためのアンテナの配置位置や信号処理等の仕様策定を行った。次に、②誤差低減のための位置推定アルゴリズムの検討を行った。これは①で検討した送信機側の指向性情報を元にターゲットの位置推定誤差を低減するアルゴリズムの提案である。これにより、歩行者検出等の低反射ターゲットの検出を可能とするアルゴリズムの検討を行った。さらに、③ターゲットからの反射信号のみでなく、壁面や路上などのいわゆるマルチパス波を利用した位置推定誤差低減手法を検討した。これは、マルチパスの反射点を推定し、推定された反射点を仮想受信機位置として処理を行う手法である。これにより、ターゲットの観測を多方面から行うことが可能となり位置推定誤差の低減が可能となった。最後に、④試作機への実装を試みた。特に送信アレイの実装を行い、上記で検討を行った位置推定誤差低減手法の再評価を行った。次章から詳述を行っていく。

## 2 本助成による研究成果

### 2-1 送信アンテナのアレイ化の検討

#### (1) 本アプローチの目的

本アプローチでは近距離の障害物を検出するために必要とされる監視領域に限なく信号を送出可能な送信機について検討した。特に広視野角かつ十分な出力を得るために複数の送信デバイスを用いたアレイ送信機を考える。特に今回は送信出力の不足が問題視されている超音波レーダデバイスを念頭に検討した。アレイの構成(素子位置, 出力, 時間シフト)を決定するにあたり遺伝的アルゴリズム(GA)を適用した。以下に手順を示す。なお、本設計手順は超音波デバイス以外にも応用可能である。

#### (2) 手法概略

図1に複数のエミッタ素子を用いたアレイ送信機の構成を示す。 $\theta$ 方向における信号の和は、次式である。

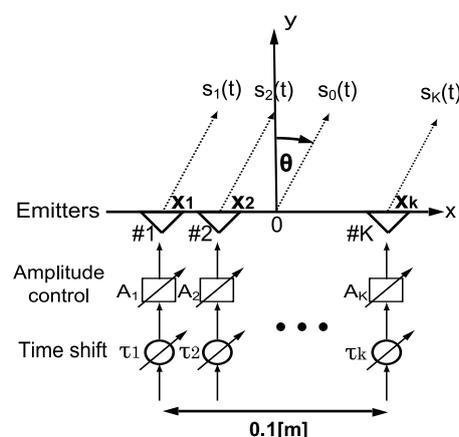


図1 送信機の構成

$$S_{sum}(t) = S_0(\theta, t) \sum_{k=1}^K A_k \exp \left[ j \left\{ -2\pi f_0 \left( \frac{x_k}{c} \sin \theta + \tau_k \right) \right\} \right] \dots (1)$$

$$= S_0(\theta, t) D(\theta)$$

ここで、 $f_0$ は信号の周波数であり本検討では一般的な40kHzとした。また、 $c$ は音速であり、今回340m/sとした。 $D(\theta)$ はアレイファクタであり、絶対値 $|D(\theta)|$ は指向性パターンと呼ばれている。この指向性パターンで、アレイ化による利得を評価する。駐車補助での利用を考え、 $\pm 60$ 度以内で利得2を目標値とする[1]。これらを達成するアレイ構成はGAを用いて導いた[2]。素子位置、出力、時間シフトをデジタルに符号化し染色体を形成する。複数の染色体をランダムに生成し、各染色体が与えるCost関数値を計算する。高いCost関数値を持つ上位半分の染色体を用いて交叉をする。その後一定の割合で突然変異を発生させる。以上の操作を繰り返すことにより最も高いCost関数値を持つ染色体が導かれる。Cost関数として指向性パターン上における次の面積比を用いた。

$$\frac{(\text{プロット}|D(\theta)|における振幅2, \pm 60^\circ\text{内の領域})}{(\text{振幅2, \pm 60^\circ\text{内の領域} < 図3の斜線部 >)} \dots (2)$$

GAを行う際、最小素子間隔が0.01m、素子位置は原点对称という制約を加えた。

### (3) 数値例

GAを用いてアレイ構成を導く(表1)。素子数は3個~9個で試みた。結果として素子数を増やすとCost関数値が増加する。一例としてCost関数値が100%である素子数8について表2と図3に結果を示す。図3より、GAにより導かれたアレイ構成が目標利得2を達成していることが確認できる。

表1 適用した遺伝的アルゴリズムの諸元

素子位置(m)	$x_k$	6bit(最大0.1m, 分解能0.001m)
出力調整	$A_k$	2bit(最大1, 分解能0.25)
時間シフト(s)	$\tau_k$	5bit(最大25 $\mu$ s, 分解能1 $\mu$ s)
染色体数(突然変異数)		5000(1000)
世代更新回数		50回

表2 GAより導いた各値(素子数:8個)

素子位置(m)	$\pm 0.035, \pm 0.025, \pm 0.015, \pm 0.005$
出力調整	1, 1, 1, 0.75, 1, 1, 0.75, 0.75
時間シフト( $\mu$ s)	0, 15, 6, 7, 4, 9, 18, 0

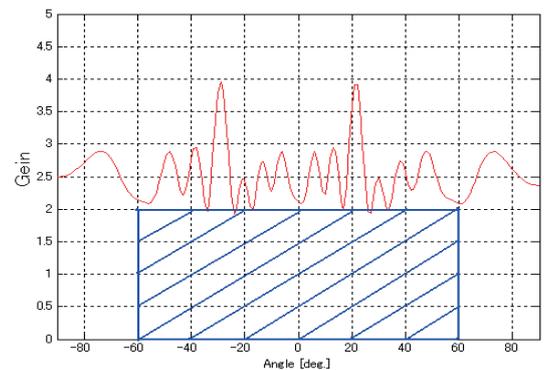


図3 GAより導かれた指向性パターン

## 2-2 誤差低減のための位置推定アルゴリズムの検討

### (1) 本アプローチの目的

レーダネットワークでは複数のレーダを使用することにより広範囲、高精度の検出が期待できる。レーダネットワークでは、設置したレーダ全てから各障害物までの測距値が得られる(測距値リスト)。これらの測距値リストを用いて、複数の障害物の位置を推定しなければならない。ここで、個々のレーダの性能に加え、複数のレーダから集まった測距値リストを処理するデータ処理部も障害物の位置を推定する性能を大きく左右する。

レーダネットワークにおける位置推定手法について、これまで多くの研究が行われてきている。これらは、三角測量といった幾何学的手法を基にしているものが多い[3][4]。しかし、これらは位置推定精度という観点において熟考されているとはいえない。その理由は、各測距装置における測距値に含まれる誤差が考慮されていないためである。特に、この測距誤差が大きい場合は、存在しない障害物を検出するゴーストターゲットの発生の原因にもつながる。一方、あらかじめ測距値には誤差が含まれているものと考え、測距値を確率変数とし位置推定を行う方法も研究されている。例えばMMSE(Minimum Mean Square Error)を用いた推定法やMAP(maximum a posterior probability)推定法などがある[5][6]。MMSEは複数障害物についての検討がまだ十分に行われておらず、ゴーストターゲットや測距値の欠落により障害物が検出されない場合がある。

また MAP 推定法は、高い精度が得られるという大きな利点があるが、推定すべき障害物、そしてレーダの数が増加したとき、その計算量は膨大となるという欠点がある。そこで本検討では、複数の障害物の検出を 1 つの物体の検出として扱うことで計算量を低減させ、MAP 推定法と同等の推定精度を得られる手法に注目している(計算量低減手法, EPEM 手法) [6].

しかしながら、これらの位置推定手法を用いた場合においても、観測する測定装置の配置によっては、測距誤差が大きく発生してしまう。特に、受信機を直線状に配置した場合、配置方向と同方向の位置推定誤差が大きく発生する。本検討ではこの現象を解決するために、送信アンテナをアレイ化し、送信信号の放射に指向性をもたせる。そして、その指向性情報を利用することで測距誤差を低減させる位置推定アルゴリズムを検討した。

## (2) 手法概略

まず、システムモデルを説明する。総数  $K$  個の受信機を図 4 のように配置する。受信機の前には、監視エリアである  $x$ - $y$  平面が存在している。原点を中心とした座標系を用い、受信機は  $x$  軸上に等間隔に配置する。受信機の座標は左から  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K$  とする。障害物は  $N$  個存在すると仮定する。それぞれの障害物の座標は  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$  である。  $k$  番目の受信

機からは測距値リスト  $\tilde{R}_k = \{\tilde{r}_{k1}, \tilde{r}_{k2}, \dots, \tilde{r}_{kN_k}\}$  が得られる。ここで  $N_k$  は  $k$  番目の受信機の測距値リストに含まれる測距値の個数を表している。ここで添字  $\tilde{\cdot}$  は測定値を表す。各受信機の測距値  $\tilde{r}_{kn}$  には以下に示すような誤差が含まれるものとする。

$$\tilde{r}_{kn} = r_{kn} + \varepsilon_k \quad \dots (3)$$

ここで、 $r_{kn}$  は  $k$  番目の受信機において、 $n$  番目に観測された障害物までの距離(真値)を表す。また、 $\varepsilon_k$  は測距誤差を表しており、平均が 0、分散が  $\sigma^2$  の確率変数である。各レーダから得られた測距値リストと受信機の位置を用いて、障害物の座標を推定する。ここで添字「 $\hat{\cdot}$ 」は推定値をあらわす。

次に位置推定アルゴリズムについて記していく。説明のため、障害物の数は 2 個、レーダの数は 4 個とする(図 5)。次の確率を考える。

$$P(\hat{x}, \hat{y} | \tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3, \tilde{R}_4) \quad \dots (4)$$

上式は、測距値リスト  $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3, \tilde{R}_4$  が得られた時、障害物が座標  $(x, y)$  に存在する確率を表す。上式は、ベイズの定理を利用すると

$$\frac{P(\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3, \tilde{R}_4 | \hat{x}, \hat{y})}{P(\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3, \tilde{R}_4)} \cdot P(\hat{x}, \hat{y}) \quad \dots (5)$$

となる。確率  $P(x, y)$  の一様分布であることや、分母が  $(x, y)$  とは無関係であるとする、以下の式と等しい。

$$P(\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3, \tilde{R}_4 | \hat{x}, \hat{y}) \quad \dots (6)$$

各レーダは独立なので、上式は、以下の式のように各レーダ同士の積の形へと変形することができる。

$$\prod_{k=1}^4 P(\tilde{R}_k | \hat{x}, \hat{y}) \quad \dots (7)$$

上式の  $\tilde{R}_k$  は、各障害物までの測距値  $\tilde{r}_{k1}, \tilde{r}_{k2}$  を含んだベクトル値である。この各障害物までの測距値と各障

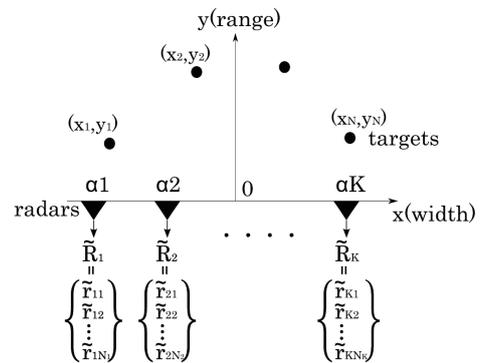


図 4 レーダと障害物の関係

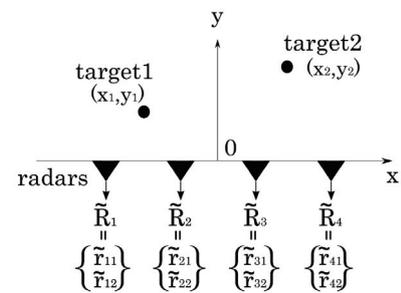


図 5 レーダと障害物の関係(N=4)

害物の位置との組み合わせを考えると、上式は以下の式ようになる。

$$\prod_{k=1}^4 [B_{k,1}P(\tilde{r}_{k1}|\hat{x}, \hat{y}) + B_{k,2}P(\tilde{r}_{k2}|\hat{x}, \hat{y})] \quad \dots (8)$$

ここで、 $B_{k,l}$ は受信機  $k$  の測距値リストにおける  $l$  番目の測距値が、 $(x, y)$  に存在する障害物までの距離を表す確率である。推定するパラメータ  $(x, y)$  を  $k$  番目のレーダまでの距離として表すと以下の式ようになる。

$$\hat{r}_k = \sqrt{(\hat{x} - \alpha_k)^2 + \hat{y}^2} \quad \dots (9)$$

上式を用いると、行ってきた式変形は次のようになる。

$$\prod_{k=1}^4 [B_{k,1}P(\tilde{r}_{k1}|\hat{r}_k) + B_{k,2}P(\tilde{r}_{k2}|\hat{r}_k)] \quad \dots (10)$$

ここで、 $P(\tilde{r}_{kn}|r_k)$  は、障害物が距離  $r$  に存在したときに  $\tilde{r}_{kn}$  と観測される確率を表している。つまり測距誤差の分布といえる。上式を用いることで、測距値リスト  $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3, \tilde{R}_4$  が得られた時、座標  $(x, y)$  に障害物が存在する確率の分布が求まる(存在確率分布)。図6に障害物存在時(座標(0, 9))のときの存在確率分布の例を示す。この分布の確率が高い地点を選ぶことにより、障害物の位置が推定できる。存在確率を元に障害物位置を推定するため、本手法を EPEM(Existence Probability Estimation Method)法と呼ぶ。この手法は、最適である MAP 推定法と同等の高い精度で障害物の位置を推定できる[6]。

本 EPEM 手法に送信機の指向性情報を付加する。2.1 節では送信機をアレイ化することで指向性を形成できることがわかっている。今回提案する全体のシステム像を図7に示す。ビーム形成のための複数のアンテナを有した送信機から信号は放射され、分散配置した受信機で障害物からの反射信号を受信する。

次に、図8のように  $L$  個のアンテナで構成される送信アレイアンテナを考える。各アンテナは、 $x$  軸上の原点を中心として左右対称に配置する。それぞれのアンテナの座標は  $\beta_l$  とする。また  $A_l, s_l(t)$  はそれぞれ  $l$  番目のアンテナの出力係数と放射信号を表す。このとき  $\theta$  方向における信号の和は以下の式で表される。

$$S_{sum}(\theta, t) = s(\theta, t) \sum_{l=1}^L A_l \exp\{-j2\pi f_0 (\frac{\beta_l}{c} \sin \theta)\} \quad \dots (11)$$

今回、 $|S_{sum}(\theta, t)|$  を指向性パターンと呼び、アレイ化による利得を表す。この指向性パターンを利用して測距誤差の低減を試みた。ここで  $f_0$  は信号の中心周波数、 $c$  は光速である。また  $s(\theta, t)$  には各素子に共通する特徴が

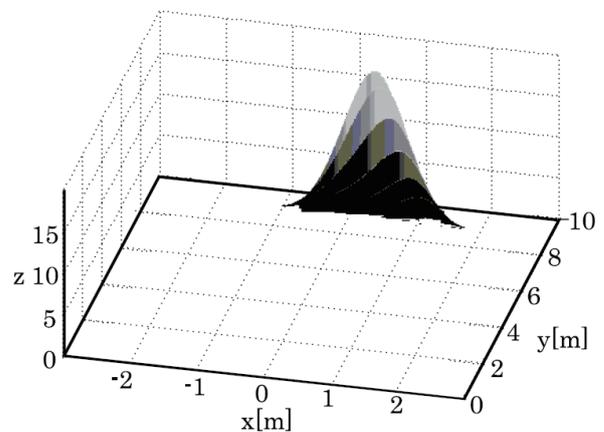


図6 レーダと障害物の関係(N=4)

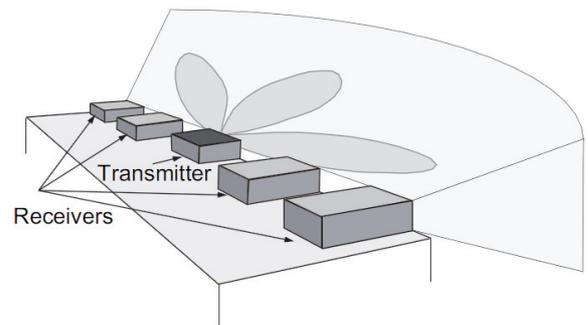


図7 提案システムの全体像

次に、図8のように  $L$  個のアンテナで構成される送信アレイアンテナを考える。各アンテナは、 $x$  軸上の原点を中心として左右対称に配置する。それぞれのアンテナの座標は  $\beta_l$  とする。また  $A_l, s_l(t)$  はそれぞれ  $l$  番目のアンテナの出力係数と放射信号を表す。このとき  $\theta$  方向における信号の和は以下の式で表される。

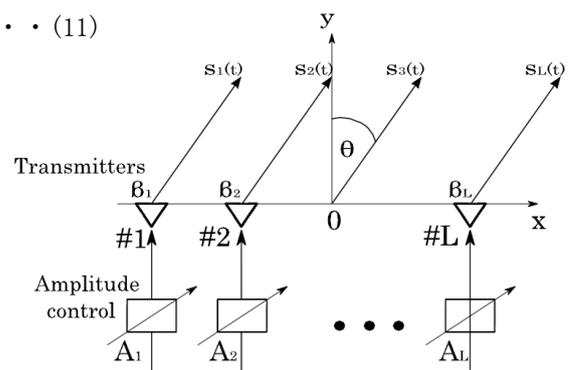


図8 送信機の構成

含まれており、例えば素子自体の指向性パターンもこれに含まれる。

ある指向性パターンが与えられたとき、指向性によるビームが向いている領域に存在する障害物からのみ信号が反射されるはずである。そこで、障害物の存在位置を特定するための関数を次のように考える。

$$D_p(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{検出可能領域内の場合} \\ 0 & \text{検出可能領域外の場合} \end{cases} \quad \dots (12)$$

つまり検出可能領域を元に、障害物からの反射可能性の有無を表す関数である。この検出可能領域は指向性パターンから変換して求める。以下、変換手順について順に示していく。

ある指向性パターンが得られたとする。この指向性パターンを元として、レーダ方程式により  $x$ - $y$  平面の検出される予定の領域へ変換する[7]。

$$S = \frac{\gamma P_t}{R^4} \quad \dots (13)$$

上式はレーダ方程式を表し、ここで  $S$  はレーダの受信アンテナで受信される反射波の電力、 $\gamma$  はアンテナ利得、障害物の有効反射面積などから定まる係数、 $P_t$  はレーダの送信電力、 $R$  はアンテナからの距離を表す。上式を  $R$  についての式に直すと以下の式となる。

$$R = \sqrt[4]{\frac{\gamma}{S} P_t} \quad \dots (14)$$

今、送信電力が  $P_t$  の  $\delta$  倍となったとする。そのときの距離  $R'$  は以下の式になる。

$$R' = \sqrt[4]{\frac{\gamma}{S} \delta P_t} = \sqrt[4]{\delta} R \quad \dots (15)$$

これより、 $R'$  と  $R$  の関係式が導かれる。このとき、 $|S_{sum}(\theta, t)|_{max}$  の電力を基準送信電力  $P_t$  とし、そのときの最大距離を  $R_{max}$  と仮定した。以上より求められた式を EPEM 手法(式(10))と掛け合わせることで以下の式が得られる。

$$\left[ \prod_{k=1}^4 [B_{k,1} P(\tilde{r}_{k1} | \hat{r}_k) + B_{k,2} P(\tilde{r}_{k2} | \hat{r}_k)] \right] * D_p(x, y) \quad \dots (16)$$

つまり上式を用いることで送信信号の指向性を加味した障害物の存在確率分布が求まる。ターゲットの検出は存在確率の高い箇所の探索を行う。本手法を EPEMD (Existence Probability Estimation Method using Directivity information) と呼ぶ。なお、検出可能領域を網羅するために、指向性を形成したときにヌルである方向を補うように、指向性を変えて数回検出を繰り返す。このようにすることで広い視野角を確保可能となる。作成する指向性を多くのローブやヌルで構成を行うことでスキャン回数の低減が可能となる。また、ビームが鋭ければ鋭いほどより遠くへと放射可能であり、さらに推定位置誤差の低減が期待できる。

### (3) 数値例

従来手法 EPEM 手法と提案手法 EPEMD 手法との特性を、障害物の推定位置分布の観点から評価する。図 9 に今回設計したアレイアンテナの指向性パターンを示す。さらに、式(15)より放射可能領域に変換した(図 10)。このとき  $|S_{sum}(\theta, t)|_{max} = 2$ 、 $R_{max} = 10[m]$  とした。本来、広域である監視領域を限なく検出するためには、前節で述べたように

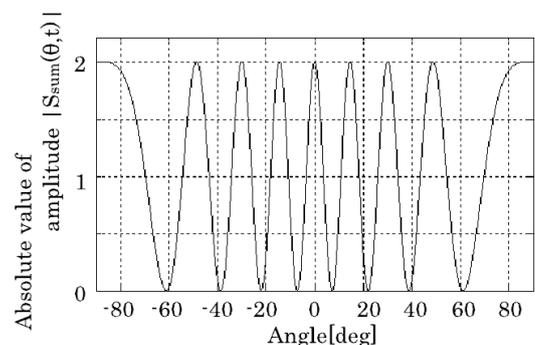


図 9 設計した送信指向性パターン

指向性を変えて複数回スキャンを行う必要がある。しかし、本評価ではアルゴリズムの位置推定特性を見るために、1 指向性パターンのみを再現した。送信機の各諸元は表 3 である。素子配置範囲は、今回は近距離検出を考えているため 0.1m とした。受信機のシミュレーション諸元は、受信機の数について 2m の開口長に等間隔に 3 個、障害物数を 1 つ、障害物の座標は (0, 9) [m] とした。また、測距誤差特性はガウス分布に従うとし、分布の標準偏差は 0.075m (測距誤差 0.3m を想定) とした。

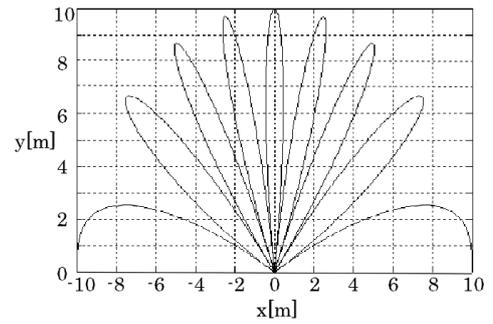


図 10 放射可能領域

表 3 送信アレイのパラメータ

Frequency: $f_0$	24[GHz]
Number of transmitters: $L$	3
Width of array[m]	0.1
Element positions[m]: $B_l$	-0.05 , 0 , 0.05
Amplitude control: $A_l$	0.5 , 1 , 0.5

図 11, 12 に推定位置分布を示す。この推定位置分布は、試行を 20,000 回行った時に得られる推定位置の分布である。各々の推定位置は式 (16) より得られる存在確率分布のピーク値とした。これら推定位置分布において各障害物における分布の平均値と分散値を表 4 に示す。 $x$  軸の分散値が減少しているのがわかる。結果より、 $y$  軸方向の分散値は従来手法と提案手法でほとんど違いは見られないことが、また、従来手法の問題点であった測距誤差の大きい  $x$  軸方向の分散値が効果的に減少していることがわかる。つまり、提案手法は、受信機のみで障害物の位置を推定する従来手法よりも測距誤差を低減させることができた。

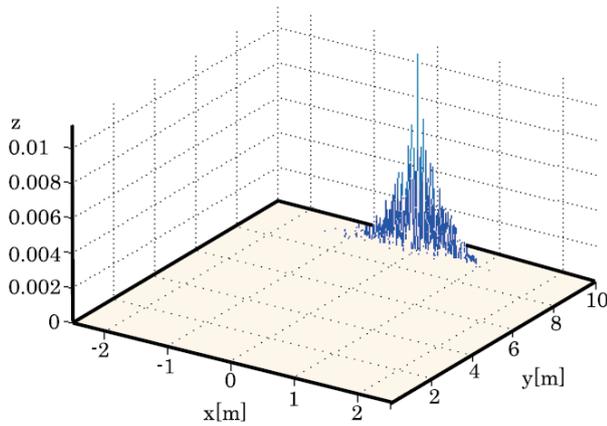


図 11 推定位置分布 (従来手法)

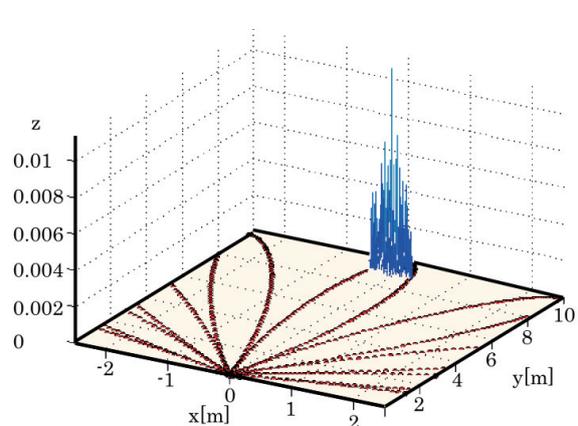


図 12 推定位置分布 (提案手法)

表 4 各推定位置分布の統計量 (分散値)

	$x$ の分散値	$y$ の分散値
従来手法 (EPEM)	0.240	0.00237
提案手法 (EPEMD)	0.0339	0.00179

### 3-1 マルチパス環境下での位置推定アルゴリズム(EPEMR 手法)の検討

#### (1) 本アプローチの目的

近距離広範囲に存在する障害物を検出する際、広い視野角を有する受信機を用いる。そのため、多くのマルチパスが受信されやすくなる。また、歩行者などの反射が弱いターゲットを検出するためには、受信感度

を上げる必要が生じ、マルチパスが受信されやすくなる。本手法では、このマルチパスを有効に利用し、ターゲットの位置推定精度を向上させる手法を検討した。マルチパスの発生原因が路面やガードレール、隣接する壁など既知の障害物である場合などを想定する。また、室内におけるセキュリティ用途等でレーダネットワークを利用する際にも活用できる。複数センサを利用する場合、センサの配置状況に位置推定特性は大きく依存する[8]。特に車載用レーダネットワークの場合、前方のターゲットを車輛のバンパなどから一方向から観測することとなる。この場合、車幅方向に非常に大きな位置推定誤差が発生する。そこで、本アプローチでは、ターゲット以外からの反射波の発生が予想される場合、反射点の推定を行う。そして、マルチパス信号と反射点の情報を元に、これらを壁面に設置したセンサからの信号と仮想的に見なすことで、ターゲットに対し取り囲むようにセンサが配置された状況とする。これにより、一方向からのターゲット観測では無くなるため、推定位置誤差の低減に繋がる。このような反射波を利用した位置推定アルゴリズムを提案した。以降、本手法を EPEMR (Existence Probability Estimation Method using Reflected signals) 手法と呼ぶ。

## (2) 手法概略

図 13 に想定する受信機の配置とターゲット、壁面、反射波の状況を示す。簡単化のため受信機は 4 個、ターゲットは 1 個、壁面での反射回数は 1 回とし、反射波は 2 パスとする。ターゲットの位置推定は以下の順で行われる。

1.  $k$  番目の受信機では反射波が含まれた複数個の測距値  $\tilde{r}_{kn}$  がリスト  $\tilde{R}_k$  として得られている。
2. 以下の EPEM 手法(式(8)-(10))を用いてターゲットの位置を推定する。

$$\begin{aligned}
 p(\hat{x}, \hat{y} | \tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3, \tilde{R}_4) = & \\
 & B \prod_{k=1}^4 [p(\tilde{r}_{k1} | \hat{x}, \hat{y}) + p(\tilde{r}_{k2} | \hat{x}, \hat{y}) + p(\tilde{r}_{k3} | \hat{x}, \hat{y})] \\
 = & B \prod_{k=1}^4 [p(\tilde{r}_{k1} | \hat{r}_k) + p(\tilde{r}_{k2} | \hat{r}_k) + p(\tilde{r}_{k3} | \hat{r}_k)] \quad \dots (17)
 \end{aligned}$$

ここでレーダはターゲットと測距値との対応関係を全く知らないとし、ターゲットと各受信機は独立とする。そのため、 $B_{ki}$  は全て同じ値となり、係数  $B$  となる。また、 $p(\tilde{r}_{kn} | \hat{x}, \hat{y})$  は座標  $(\hat{x}, \hat{y})$  にターゲットがあるときに測距値が  $\tilde{r}_{kn}$  となる確率であり、各レーダでの測距誤差を意味する。上式により、各測距値リストが得られたとき、座標  $(\hat{x}, \hat{y})$  にターゲットが存在する確率が求まる。これによりターゲットの位置が推定できる。

3. 推定位置を元にターゲットと受信機との間の直接パスの距離を計算し、測距値リストから抜き取る。結果、測距値リスト内は反射波の測距値のみとなる。
4. 推定されたターゲット位置と受信機とを焦点にもつ楕円を考える。各焦点から楕円上の点までの距離は一定である。この距離を測距値リスト内にある反射波による測距値とする。
5. 楕円と壁面との交点を求める。これを壁面における反射点とする。
6. この反射点と受信機との距離を算出し、反射波による測距値から差し引く。これを、反射点からターゲットまでの測距値とする。
7. 壁面上での反射点を仮想のセンサ位置とし、受信機を含めて再度、EPEM 手法でターゲットの位置を推定

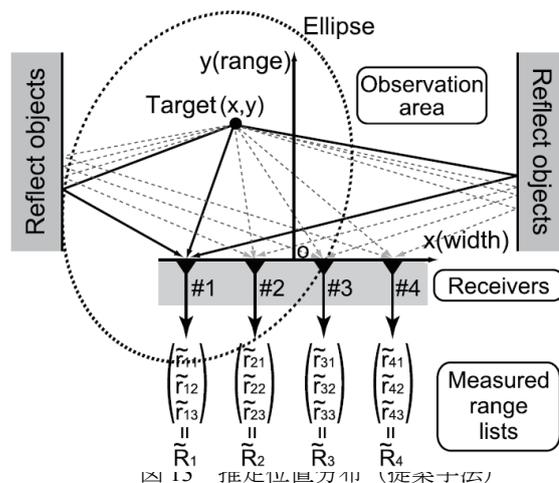


図 13 推定位置推定用 (仮想センサ)

する。

### (3) 数値例

ターゲットの位置推定特性を本提案を用いた場合と従来手法 (EPEM 法) の場合とで比較する。諸元を表 5 に示す。測距誤差を 0.3m と想定し、5,000 回の試行の元、推定された位置の分布の分散を用いて評価した。推定位置分布を図 14, 15 に示す。また、分布の分散を表 6 に示す。従来手法の場合、受信機の配置方向と同一の  $x$  軸方向の誤差が大きく発生している。一方、提案手法では低減出来ていることが確認できる。

表 5 シミュレーション諸元

受信機 $x$ 座標[m]	1.0,0.3,-0.4,-1.1
壁 $x$ 座標 [m]	3.0,-3.0
Target 位置[m]	( $x,y$ )=(0,8)

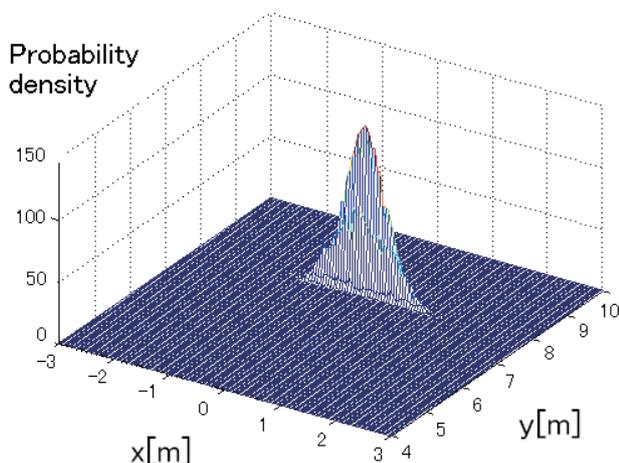


図 14 推定位置分布 (EPEM)

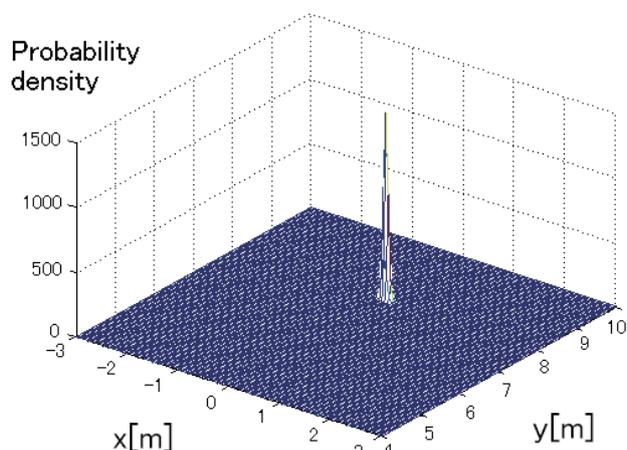


図 15 推定位置分布 (EPEMR)

表 6 推定位置分布の分散値

	Var[x]	Var[y]
従来手法 (EPEM)	0.1563	0.0018
提案手法 (EPEMR)	0.0025	0.0008

## 4-1 アレイ化を施した試作機の製作と EPEMD 手法の実証評価

### (1) 本アプローチの目的

超音波レーダを複数個用いたレーダネットワークを試作する。試作機では、送信機として複数の超音波送信機で構成されたアレイ送信機を形成する。このアレイ送信機を用いて、前述した EPEMD 手法を実装し、評価を行う。この評価を通じて、提案手法の有効性とシミュレーションでは見えない実装上の問題点の確認を目的とする。

## (2) 試作機概略

今回製作した試作機の全体像を図 16 に示す。まず、DSP ボード(TI 社 DSK6713)の拡張ボードである平塚エンジニアリング社製 DSK6713IF/AO2 で 40kHz のパルス波を 500[ $\mu$ s]間出力する。このパルス群が 62[ms]間隔で繰り返し送信される。このとき、次のパルスが発生するまでの間隔は最大 10[m]を測定できるように設計している。また、出力調整や時間遅延調整もボード上で行うことができる。このような信号が送信機である超音波デバイスに送られる。送信波は障害物によって反射され、反射波が受信機信号へと入力される。その受信信号は LEVBUF102(平塚エンジニアリング社製レベルバッファアンプ)によって増幅される。増幅された信号は DSK6713IF/AIO2 へと入力され標準化周波数 500kHz の AD 変換機によってデジタル信号に変換される。そのデータがメモリに保存される。そのデータを PC に送り、matlab により EPEM 或いは EPEMD 手法を用いて障害物座標を求める。今回、送信機と受信機は村田製作所の MA40S4S と MA40S4R を使用した[9]。送信機と受信機の指向性特性を図 17 に示す。

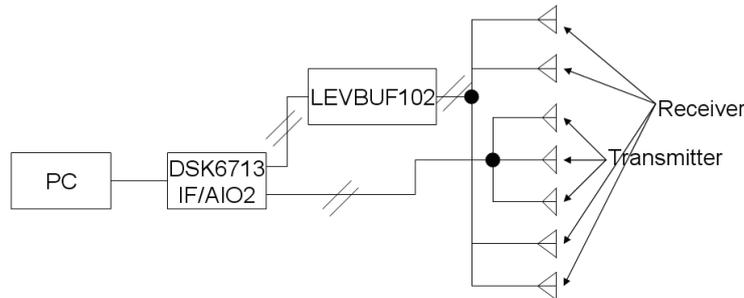


図 16 試作機構成

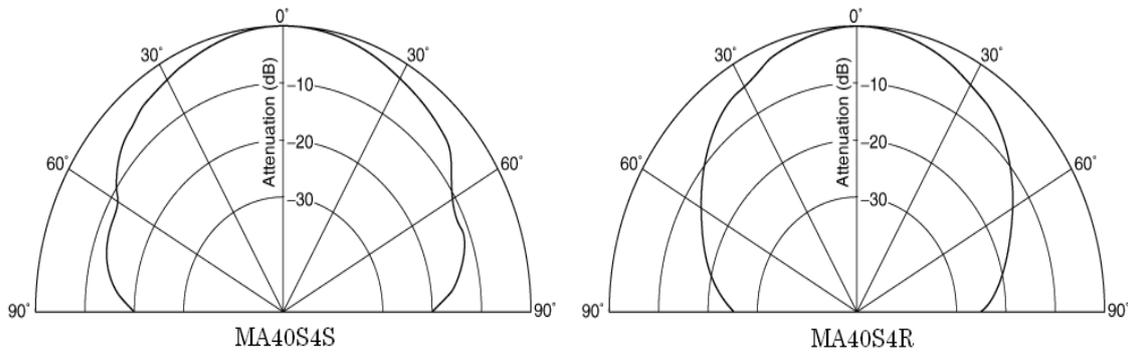


図 17 単体デバイスの指向性 (左:送信機, 右:受信機) [9]より引用

## (3) 試作機諸元に基づいた再設計とシミュレーションによる特性把握

今まで行ってきたシミュレーションでは送信機の指向性は無指向性として扱った。本試作に対して設計を行うため、新たに送信機として MA40S4S を使用した場合のアレイアンテナ設計を行った。図 18 に今回設計したアレイアンテナの指向性パターンを示す。また、放射可能領域は図 19 に示す。送信機の各諸元は表 7、受信機の各諸元は表 8 である。

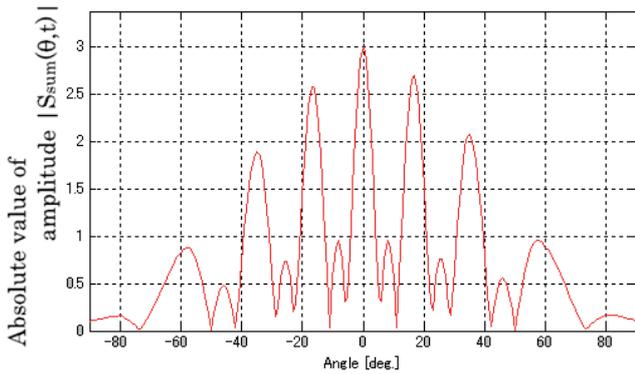


図 18 アレイアンテナの指向性パターン

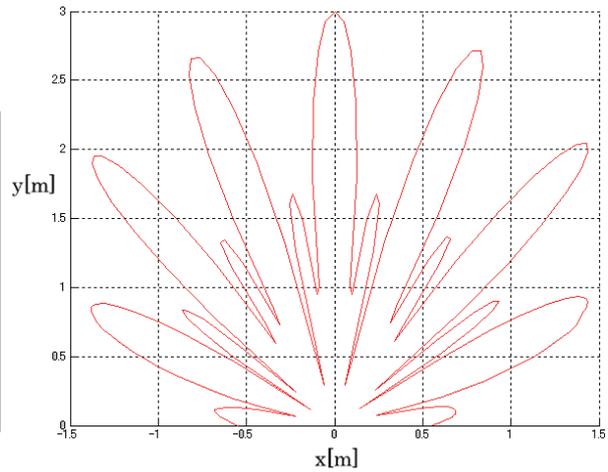


図 19 放射可能領域

表 7 送信機の諸元

Frequency: $f_0$	40 [kHz]
Number of transmitters: $L$	3
Width of array [m]	0.1
Element positions [m]: $B_l$	-0.03, 0, 0.03
Amplitude control: $A_l$	1, 1, 1

表 8 受信機の諸元

Number of receivers	4
Number of targets	1
Target position (x,y)	(0, 1.80) [m]
Total width	0.6 m
Position of receivers (x,y)	(-0.3,0), (-0.1,0), (0.1,0), (0.3,0)
Distribution of $\tilde{r}$	Gaussian distribution
Standard variation: $\sigma$	0.025 [m]
Number of iteration	10000
Observation area	x: (-1 ~ 1 [m]) y: (0 ~ 3 [m])

まず、以上の諸元を用いて計算機シミュレーションで得られる特性を導く。2.2 節と同様に推定位置分布を求め、その分散値によって位置推定特性と評価する。推定位置分布において障害物に対応する分布の分散値を表 9 に示す。2.2 節のシミュレーション結果と同様、受信機のみで障害物の位置を推定する EPEDM 手法よりも提案手法の EPEDM 手法の方が低い分散値をとっており、位置推定誤差を低減させることができることが確認できる。特に、 $x$  方向に広く発生していた誤差を低減可能であることがわかる。

表 9 推定位置分布における分散値(試作機用シミュレーション)

Target position	Method	$Var[\hat{x}]$	$Var[\hat{y}]$
(0, 1.80) [m]	Conventional (EPEDM)	0.241	0.072
	Proposal (EPEDM)	0.188	0.029

#### (4) 試作機を用いた測定による特性把握

次に試作機を用いて測定した結果を示していく。実験においても使用した諸元は表 5 と表 6 である。図 20 は実際に試作した装置の全体像である。また、図 21 は実験の様子である。まず、MA40S4S と MA40S4R の測定した指向性特性を図 22 と図 23 に示す。また、設計したアレイアンテナにて測定した指向性特性を図 24 に示す。参考までに単体で送信した場合の指向性特性も合わせて示す。4mV 程の雑音が発信信号を出力していないときにもあったことを考慮に入れば、ほぼ設計どおりの波形が出ていることがわかる。

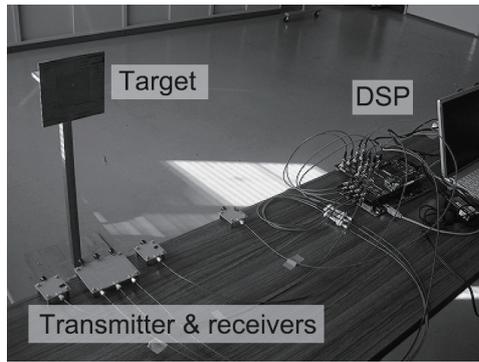
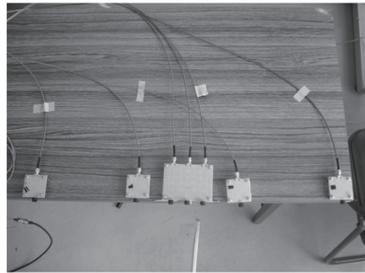
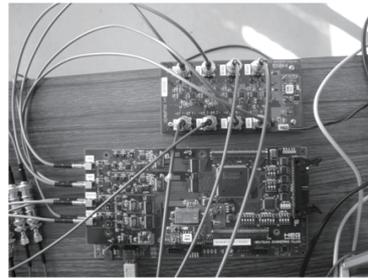


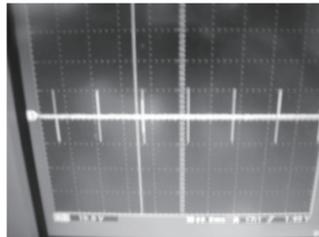
図 20 : 試作した装置の全体像



送信機(中央3素子)と受信機(両サイド4素子)



DSK6713IF/AIO2(下)とLEVBUF102(上)



送信パルス信号

図 21 ; 実験の様子

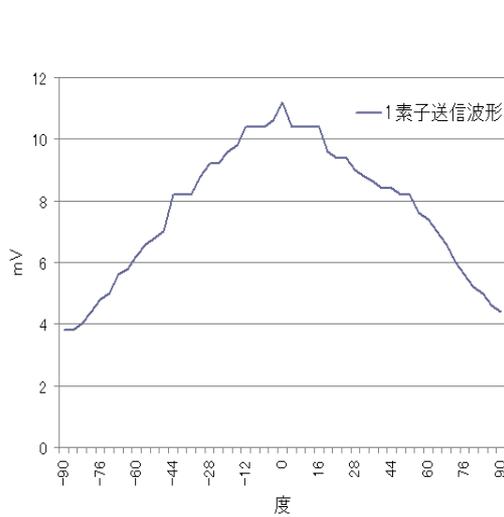


図 22 : MA40S4S の指向性特性(測定値)

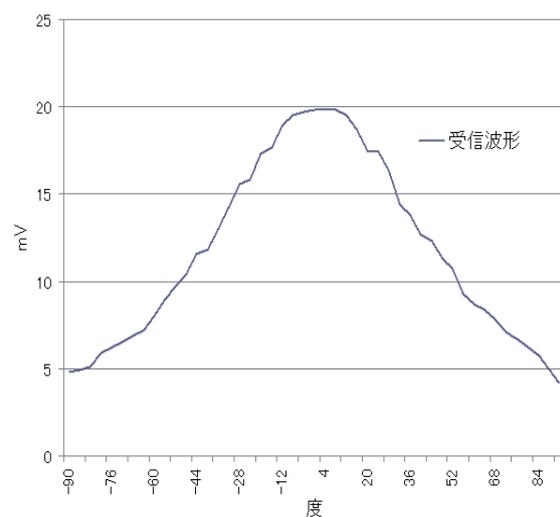


図 23 : MA40S4R の指向性特性(測定値)

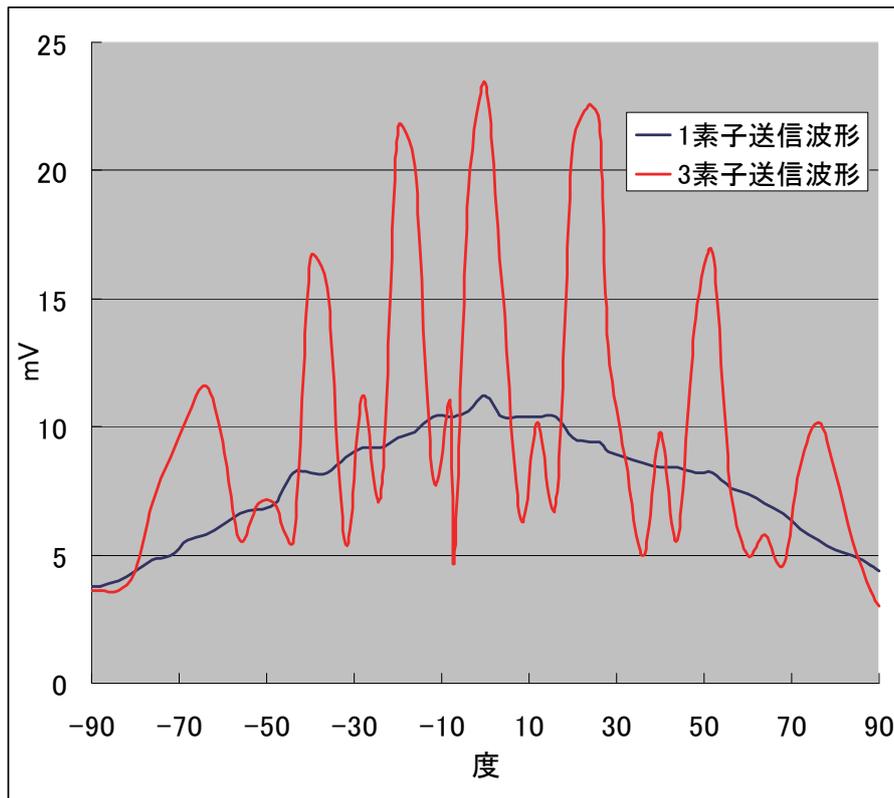


図 24：設計したアレイアンテナの指向性パターン(測定値)

実験データを元に作成した推定位置分布を図 25，図 26 に示す。また，これら推定位置分布において各障害物における分布の平均値と分散値を表 10 に示す。

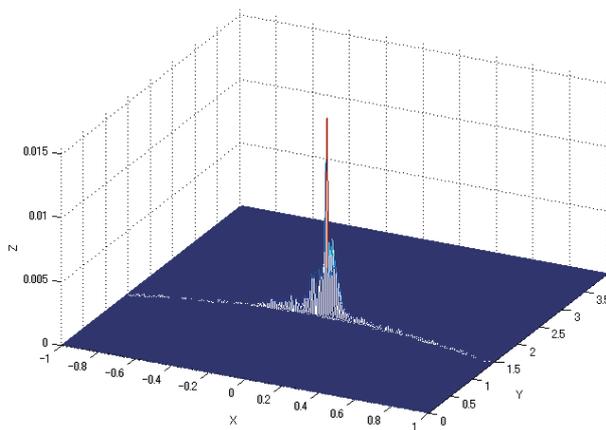


図 25：推定位置分布(従来手法，実験値)

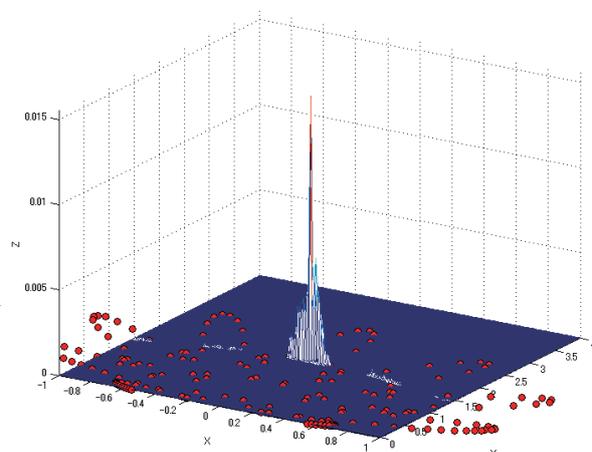


図 26：推定位置分布(提案手法，実験値)

表 10：推定位置分布における平均値と分散値(実験値)

Target position	Method	$Var[\hat{x}]$	$Var[\hat{y}]$
(0, 1.80) [m]	Conventional (EPEM)	0.212	0.057
	Proposal (EPEMD)	0.150	0.045

これらの結果より，試作機における実測値においても，従来手法と比べ提案手法は  $x$  軸方向， $y$  軸方向共に分散値を低減させることが確認できる。

## 【参考文献】

- [1] M. Klotz, H. Rohling, "A High Range Resolution Radar System Network for Parking Aid Applications," International Conference on Radar Systems, May 1999.
- [2] R. L. Haupt, "An Introduction to Genetic Algorithms for Electromagnetics," IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol.37, No.2, pp.7-15, April 1995.
- [3] R.Mende, "A multifunctional automotive short range radar system," German Radar Symposium 2000, Oct.2000.
- [4] Luigi Giubbolini, "A Multistatic Microwave Radar Sensor for Short Range Anticollision Warning," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.49, no.6, Nov, 2000,
- [5] 羽多野裕之, 山里敬也, 岡田啓, 片山正昭, "レーダネットワークにおける MMSE を用いた障害物の位置推定" 電子情報通信学会論文誌, vol.J88-A, no.12, pp.1456-1459, Dec.2005.
- [6] 羽多野裕之, 山里敬也, 片山正昭, "車載用レーダネットワークにおける複数障害物の位置推定手法に関する一検討" 自動車技術会論文集, vol.38, no.5, pp.191-196, Sept.2007.
- [7] 吉田孝, "改訂 レーダ技術" コロナ社, 平成 15 年 2 月 15 日 初版第 4 刷発行
- [8] 水谷友治, 羽多野裕之, 桑原義彦, "障害物の位置推定誤差低減のための送信機の一検討," 信学技報, vol. 109, no. 218, AP2009-116, pp. 79-84, Oct. 2009.
- [9] 村田製作所ホームページ: <http://www.murata.co.jp/products/catalog/pdf/s15.pdf>

## 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
レーダネットワークにおける送信指向性情報を利用した位置推定アルゴリズム	電子情報通信学会技術研究報告(ITS)	2011 年 7 月 (投稿済・発表予定)
Performance of Localization Algorithm under Corrupted Measurement Data and Lopsided Sensor Arrangement	IEEE International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)	2011 年 2 月
A Error Reduction Algorithm for Position Estimation Systems Using Transmitted Directivity Information (Best Paper Award 受賞)	IARIA International Conference on Networks (ICN)	2011 年 1 月
反射波を利用した位置推定誤差低減のための位置推定アルゴリズム	電子情報通信学会総合大会	2010 年 3 月
レーダネットワークにおける受信機配置の検討	電子情報通信学会技術研究報告(ITS)	2010 年 2 月
障害物の位置推定誤差低減のための送信機の一検討	電子情報通信学会技術研究報告(AP)	2009 年 10 月