

修士論文

超音波センサアレイ向け多辺測量 における位置推定精度向上手法の提案

令和3年度修了

三重大学大学院工学研究科

電気電子工学専攻

通信工学研究室

森田 瑛一

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 本研究の目的	4
1.3 本論文の構成	4
第2章 関連研究	6
2.1 測距メカニズム	6
2.1.1 到来時間 (TOA: Time Of Arrival)	7
2.1.2 一定誤警報確率 (CFAR: Constant False Alarm Rate) 法	8
2.2 位置推定アルゴリズム	10
2.2.1 三辺測量	10
2.2.2 多辺測量	12
2.2.3 存在確率に基づく多辺測量	13
第3章 提案手法	16
3.1 システム構成	16
3.2 相互相関関数に基づく TDOA 計算	18
3.3 受信機ペア毎の信号到来方向推定	19
3.4 障害物方向情報に基づく重み付け関数 $W(x, y)$	19

第4章 特性評価	24
4.1 シミュレーションモデル	24
4.2 評価指標	27
4.3 評価結果	28
4.3.1 障害物存在確率分布の数値例	28
4.3.2 障害物を1個配置した場合の数値評価	30
4.3.3 障害物を複数個配置した場合の数値評価	32
4.3.4 雑音を付加した時の数値評価	35
第5章 まとめと今後の課題	41
参考文献	43
謝辞	47
研究業績	48

目 次

1.1	超音波センサアレイシステムの外観	3
2.1	伝搬経路モデル	7
2.2	送受信時間差 (TOA)	8
2.3	クラッタの確率分布と誤警報確率 (FAR) の関係性	9
2.4	三辺測量による障害物位置推定	11
2.5	存在確率に基づく多辺測量による誤差範囲 (黄色のハッチング領域)	15
3.1	提案手法におけるシステムモデル	17
3.2	受信機 n, n' での到来方向推定	20
3.3	マルチターゲット環境における TDOA 値の推定	21
3.4	重み付け関数の例	22
4.1	障害物存在確率分布例 (障害物位置 (0,7), (3,6))	29
4.2	障害物存在確率分布例 (障害物位置 (0,2), (1,2))	29
4.3	障害物の配置 (x_m, y_m) に対する検出面積 S	30
4.4	従来手法と提案手法の検出面積 S の差	31
4.5	最大確率の比 η_Q, η_P に対する平均検出面積 \bar{S}	33
4.6	閾値の最大確率に対する比 η_Q, η_P に対する平均障害物検出成功率 \bar{P}_{succ}	33

4.7	平均障害物検出成功率 \bar{P}_{succ} に対する平均検出面積 \bar{S}	34
4.8	雑音環境における障害物の配置 (x_m, y_m) に対する検出面積 S	36
4.9	雑音環境における従来手法と提案手法の検出面積 S の差	37
4.10	平均障害物検出成功率 \bar{P}_{succ} に対する平均検出面積 \bar{S} (SNR=10[dB])	38
4.11	平均障害物検出成功率 \bar{P}_{succ} に対する平均検出面積 \bar{S} (SNR=8[dB])	39
4.12	平均障害物検出成功率 \bar{P}_{succ} に対する平均検出面積 \bar{S} (SNR=6[dB])	39
4.13	SNR 値に対する平均検出面積 \bar{S} (平均障害物検出成功率 $\bar{P}_{succ} = 0.9$)	40

表 目 次

1.1 Radar と超音波センサの位置推定の比較	2
4.1 シミュレーション内容	25
4.2 SNR[dB] に対する信号振幅 A_s [V](ノイズ分散 $\sigma^2 = 10$)	25
4.3 シミュレーション諸元	26
4.4 図 4.3(a) と図 4.3(b) の z 軸比較	31
4.5 図 4.8(a) と図 4.8(b) の z 軸比較	37

第1章

序論

1.1 研究背景

現代では、人の移動や物の輸送において自動車は不可欠なものとなっている。しかしながら、自動車の普及に伴い交通事故における死亡者数は世界的に増加傾向にある [1]。自動車の安全性を高めるために、近年、自動運転技術が注目を集めており、その実用化によって、人為的な運転操作の失敗による事故の大幅な減少が期待されている。自動運転の実現のための主要技術の1つとして、自動車周囲の人や壁などの障害物環境を認識する技術がある。

現存する自動車に搭載されている環境認識技術は、イメージセンサ [2]、Lidar (Laser Imaging Detection and Ranging)[3]、Radar (Radio Detecting and Ranging)[4]、超音波センサ [5][6] などを利用したシステムなどがある。イメージセンサやLiderなどの光学系のシステムは天候や外交光の影響を受けやすいため、今回は、Radarや超音波センサの利用に着目する。表 1.1 によって、Radar と超音波センサにおける位置推定の特徴を比較する [7][8][9]。超音波センサはミリ波帯を用いた Radar と同程度の分解能を持ち、なおかつ、信号処理付加が少ない。また、超音波センサは安価なデバイスであり、自動車に複数個搭載しても、コストパフォーマンスを損ねないため、高級車から低価格帯の自動車に幅広く適用が可能である。このような大きな

表 1.1: Radar と超音波センサの位置推定の比較

性質	Radar	超音波センサ
拡張性	3次元に適応可能	3次元に低性能
正確性	1~5[m]	0.01~1[m]
堅牢性	高い	低い
信頼性	かなり良い	中程度
エネルギー効率	低い	高い
コスト	高い	中程度

長所を持つ一方で、超音波はデバイスの出力能力に限りがあるため、測定可能範囲が狭いという短所がある。

測定可能範囲の狭さを補うために、従来では、超音波センサアレイシステムが開発されてきた [10]。超音波センサアレイシステムの外観を図 1.1 に示す。図 1.1 に示すように、送信素子を複数個用いることにより、送信機をアレイ化している。送信素子から出力された音波が互いに強め合うため、音波の伝搬距離を伸長できる。また、指向性アレイ送信機の送信素子は、垂直方向に並んでいる縦アレイ構成を用いており、送信指向性は、地面と水平な二次元平面に向けられる。二次元平面を監視領域とする時、その監視領域にのみ送信指向性に向けることによって、指向性を走査することなく、短時間で監視領域全域を監視することができる。また、車両前方に受信機を複数個搭載することによって、多地点からの測距値が得られる。そのため、高精度な位置推定の実現が可能になる。

このような、複数の受信機を用いたシステムにおける障害物位置推定手法として、従来では、様々なアルゴリズムが検討されてきた。文献 [11] では、3つの受信機を

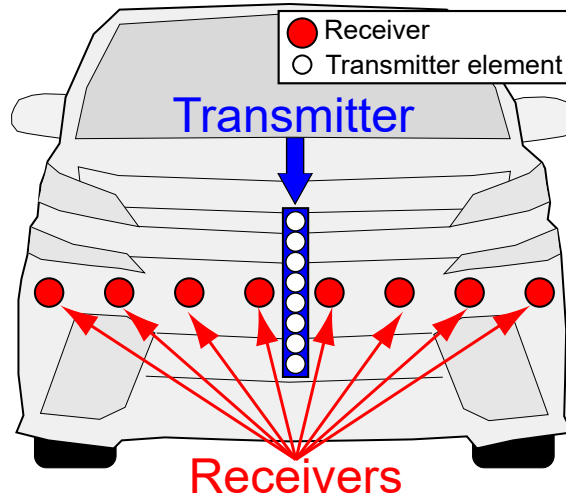


図 1.1: 超音波センサレイシステムの外観

用いた位置推定アルゴリズムとして、三辺測量が利用されている。この手法では、3つの受信機がそれぞれ、自身の座標と目標物座標間の距離を計測し、測距誤差が最も小さくなるような、最小化問題を解くことによって、障害物座標を導出する手法である。しかし、測距値として用いる値が3つのみであるため、1つの受信機の測距誤差が位置推定に与える影響が大きいという問題点がある。そこで、多数の受信機を用いた位置推定アルゴリズムとして、多辺測量が適用された [8][12]。こちらの手法では、多数の受信機によって、障害物と受信機間の距離を計測するため、三辺測量方式よりも位置推定精度の向上が見込まれる。しかし、複数の障害物が存在する場合において、各受信機で観測される複数の測距値がどの障害物に対応づけられるのかを判断する必要(測距値の関連付け問題)がある [13]。そのため、複数の障害物が存在する環境においては、不向きである。この課題を解決するために、従来では、存在確率に基づく多辺測量が用いられている [10][14][15]。このアルゴリズムでは、初めに、各受信機で得られた測距値はある確率分布に従う誤差が付加されると仮定し、障害物存在確率を計算する。次に、計算された障害物存在確率を全て

の受信機で総乗計算することによって、確率論的に障害物位置を推定する。このアルゴリズムにおいて、それぞれの受信機によって推定された障害物存在確率は、座標に対して計算されるため、前述のような測距値の関連付け問題は発生しない。しかし、自動車から前方障害物を監視する用途の場合、偏った方向からの観測によって障害物位置を推定する必要がある。このような場合、各受信機によって推定された存在確率の積は、円弧方向に位置推定精度が低いという課題がある。

1.2 本研究の目的

従来研究において、障害物の観測方向の偏りによって引き起こされる円弧方向への低い位置推定精度が課題であった。そこで、本研究の目的を存在確率に基づく多辺測量における位置推定精度の向上と設定する。従来の位置推定精度を改善するために、各受信機ペアへの音波の到来時間差 (TDOA: Time Difference of Arrival) 値に基づいて計算された重み付け関数を従来の障害物存在確率に乗じるという、新しい位置推定手法を提案する。また、計算機シミュレーションを用いた評価により、従来手法と提案手法の性能比較を行い、有効性を提示する。

1.3 本論文の構成

本論文は、以下のように構成されている。第2章では、センサの距離測定における基盤技術及び複数の受信機によって測定した測距値を用いた位置推定アルゴリズムの関連研究について述べる。第3章では、本研究にて、新たに提案する位置推定精度向上手法の詳細について述べる。第4章では、計算機シミュレーションによる評価により、評価指標を用いて提案手法の優位性を示す。第5章では、本論文のま

とめと今後の課題をいくつか挙げる.

第2章

関連研究

2.1節では、位置推定の基盤技術である受信信号の閾値を用いた測距値の計測方法について述べる。2.1.1項では、音波の送受信時刻差から、音波の伝搬経路長を計測する方法について述べ、2.1.2項では、受信信号の閾値の設定方法を説明する。2.2節では、複数の受信機を用いた、様々な位置推定手法について紹介する。2.2.1項では、最も古典的な位置推定手法として3つの受信機を用いた三辺測量アルゴリズムについて記載する。2.2.2項では、三辺測量を発展させたアルゴリズムとして、多辺測量について記載する。2.2.3項では、三辺測量や多辺測量などの点推定と異なり、確率論的に障害物位置を推定する手法について説明する。

2.1 測距メカニズム

超音波センサレイシステムにおける送受信の伝搬経路測距モデルを図2.1に示す。図では、音波の伝搬経路を破線で示している。このように、送信機から送信された音波は、各障害物に到達した後、障害物によって反射される。その後反射波は、各受信機によって受信される。送受信に要した時間から、それぞれの受信機 n は、伝搬経路 $\tilde{l}_{n,1}, \dots, \tilde{l}_{n,M}$ を計測する。本研究で取り扱う超音波センサにおける距離計測の原理について次項以降で説明する。2.1.1項で、音波到来時間 (TOA: Time Of Arrival)

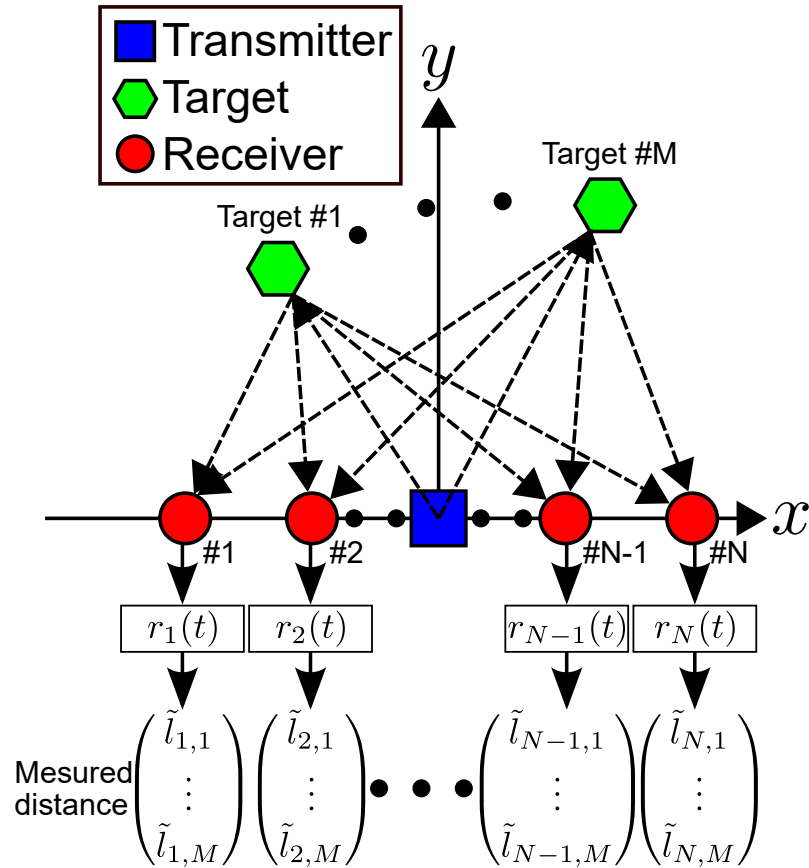


図 2.1: 伝搬経路モデル

を用いた伝搬経路の計測の詳細，2.1.2項で，雑音を含む受信信号の閾値設定方法である一定誤警報確率 (CFAR: Constant False Alarm Rate) 法についてそれぞれ説明する。

2.1.1 到来時間 (TOA: Time Of Arrival)

超音波センサでは，送信機から送信された音波が障害物によって反射され，受信機によって受信される．図2.2に示すように，送受信に要した伝搬距離によって，受信信号は遅延される．その時の音波の伝搬経路長(距離)は，送信時刻を基準とした

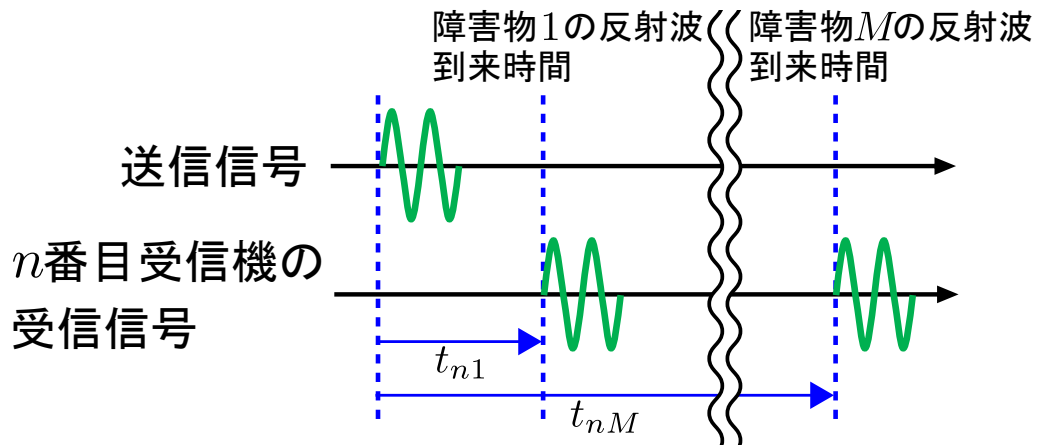


図 2.2: 送受信時間差 (TOA)

障害物 m から反射波が受信機 n へ到来した時刻 (TOA: Time Of Arrival) t_{nm} から計測される. 音速を c とすると, 伝搬経路長 l_{nm} は以下の式 (2.1) ように示せる.

$$l_{nm} = c \cdot t_{nm} \quad (2.1)$$

2.1.2 一定誤警報確率 (CFAR: Constant False Alarm Rate) 法

前項において述べた到来時間 (TOA) の計測を行う際に, 障害物からの反射波がどの時刻で受信されたかを受信機側で判定する必要がある. 受信時刻を判定するために, 受信信号の振幅に対して, 以下の数式 (2.2) のように閾値判定を行う.

$$\mathbf{t}_n = \{t | r_n(t) \geq r_{th}\} \quad (2.2)$$

ここで, $r_n(t)$ は時刻 t における n 番目受信機の受信信号振幅, r_{th} は受信信号閾値を示す. また, \mathbf{t}_n は, 受信機 n が受信した反射波到来時間の集合とする.

しかし, 実環境では, 図 2.2 のように無雑音の反射波が受信されることは現実的ではない. なぜなら, 受信信号には, 本来, クラッタ (地面反射, マルチパスなどの

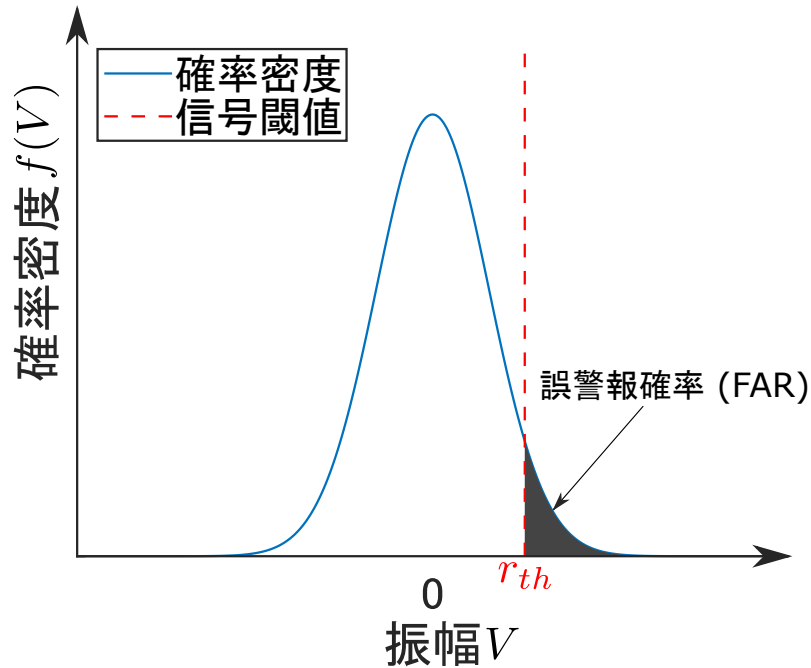


図 2.3: クラッタの確率分布と誤警報確率 (FAR) の関係性

目標物以外からの反射波) や熱雑音が含まれているからである。そのため、低い信号閾値を設定すると、これらのクラッタや熱雑音を障害物からの反射波と判定する恐れがある。反対に、高い信号閾値を設定すると、障害物からの反射波を検出できない。つまり、検出確率と誤警報確率はトレードオフの関係にある。

適切な閾値を設定するための方法として、クラッタの確率分布が既知である場合において有効な一定誤警報確率 (CFAR: Constant False Alarm Rate) 法 [16][17] という閾値設定方法がある。CFAR 法は、クラッタの確率密度の分布にかかわらず、クラッタを障害物からの反射波と誤検出する確率 (誤警報確率) が一定値となるように閾値を設定する手法である。クラッタ振幅の確率密度が、図 2.3 の実線に示すような分布であり、信号閾値が赤色の破線の時、誤警報確率 (FAR: False Alarm Rate) は、図 2.3 の黒部分の面積になる。誤警報確率と確率密度の関係性は式 (2.3) のように示

される.

$$FAR = \int_{r_{th}}^{\infty} f(V)dV \quad (2.3)$$

ここで, FAR は誤警報確率, $f(V)$ は既知のクラッタの確率密度, r_{th} は信号閾値とする. このように, 閾値を誤警報確率に応じて設定することにより, クラッタの環境にかかわらず, 一定の検出精度が実現できる.

2.2 位置推定アルゴリズム

2.2.1 三辺測量

三辺測量 [11] は, 3つの受信センサによる測距値を用いて, 障害物の位置推定を行う手法である. 受信センサの位置と障害物の位置との関係式は式 (2.4) ように表すことができる.

$$L_n^2 = \|\mathbf{l}_a - \mathbf{l}_n\|^2, \quad (n = 1, 2, 3), \quad (2.4)$$

$$\mathbf{l}_a = [x, y]^T, \quad (2.5)$$

$$\mathbf{l}_n = [x_n, y_n]^T. \quad (2.6)$$

ここで, L_n , \mathbf{l}_a , \mathbf{l}_n はそれぞれ, n 番目の受信センサ位置と障害物間の距離, 障害物の位置ベクトル, n 番目受信センサの位置ベクトルを表す. また, $\|\cdot\|$, $(\cdot)^T$ は, それぞれユークリッドノルム, 転置行列を表す. 式 (2.4) によって, 2元2次連立方程式が立式できる.

$$\begin{bmatrix} L_1^2 \\ L_2^2 \\ L_3^2 \end{bmatrix} = \|\mathbf{l}_a\|^2 + \begin{bmatrix} \|\mathbf{l}_1\|^2 \\ \|\mathbf{l}_2\|^2 \\ \|\mathbf{l}_3\|^2 \end{bmatrix} - 2 \begin{bmatrix} \mathbf{l}_1^T \\ \mathbf{l}_2^T \\ \mathbf{l}_3^T \end{bmatrix} \mathbf{l}_a \quad (2.7)$$

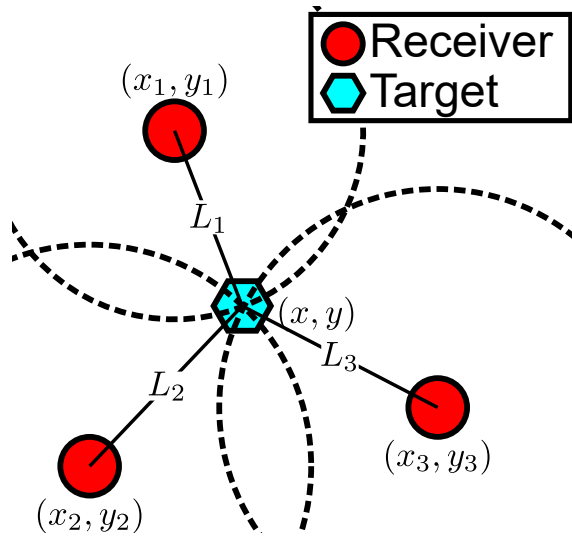


図 2.4: 三辺測量による障害物位置推定

式 (2.7) を \mathbf{l}_a について解くと、以下のようなになる。

$$\mathbf{l}_a = \mathbf{W}^{-1}\boldsymbol{\alpha} \quad (2.8)$$

ここで、 $(\cdot)^{-1}$ は逆行列を表す。ただし、

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_2^T - \mathbf{l}_1^T \\ \mathbf{l}_3^T - \mathbf{l}_1^T \end{bmatrix}, \boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} (-L_2^2 + L_1^2 + \|\mathbf{l}_2\|^2 - \|\mathbf{l}_1\|^2) / 2 \\ (-L_3^2 + L_1^2 + \|\mathbf{l}_3\|^2 - \|\mathbf{l}_1\|^2) / 2 \end{bmatrix}$$

である。3つの受信センサが測定した測距値 L_n と既知の受信センサ座標 \mathbf{l}_n から、式 (2.8) によって、未知の障害物座標 \mathbf{l}_a を推定できる。

幾何学的には、図 2.4 に示すように、3つの受信センサ座標を中心とする半径 L_n の円の交点を求めることにより、障害物座標 \mathbf{l}_a を導出することができる。しかし、測距値として用いる値が3つであるため、1センサの測距値に含まれる誤差が大きな測位誤差を引き起こす。

2.2.2 多辺測量

前節の三辺測量は3つの受信センサを用いて測位を行ったのに対して，多辺測量 [8][12] は多数の受信センサを用いて測位を行う方式である．多数の受信センサを用いることによって，3センサのみを用いる三辺測量よりも測位精度の向上が見込まれる．

障害物座標 $\mathbf{l}_a = [x, y]^T$ は式 (2.9) を最小化することによって求められる．

$$U(x, y) = \sum_{n=1}^N u_n(x, y)^2 \quad (2.9)$$

ここで， N は受信センサの個数， $u_n(x, y) = \tilde{L}_n - \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2}$ であり， n 番目のセンサと障害物間の距離の測距値と真値との差を表す． $(\tilde{\cdot})$ は (\cdot) の測定値を示す．この最小化問題の解は，式 (2.10) となる．

$$\mathbf{l}_a = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \boldsymbol{\alpha} \quad (2.10)$$

ただし，

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_2^T - \mathbf{l}_1^T \\ \mathbf{l}_3^T - \mathbf{l}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{l}_N^T - \mathbf{l}_1^T \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} (-\tilde{L}_2^2 + \tilde{L}_1^2 + \|\mathbf{l}_2\|^2 - \|\mathbf{l}_1\|^2) / 2 \\ (-\tilde{L}_3^2 + \tilde{L}_1^2 + \|\mathbf{l}_3\|^2 - \|\mathbf{l}_1\|^2) / 2 \\ \vdots \\ (-\tilde{L}_N^2 + \tilde{L}_1^2 + \|\mathbf{l}_N\|^2 - \|\mathbf{l}_1\|^2) / 2 \end{bmatrix}$$

となる．

このアルゴリズムでは，三辺測量を用いた測位よりも障害物の位置推定精度が向上する．しかしながら，複数の障害物が存在する場合，各受信センサでは複数の測距値が観測されるため，全受信センサで同一障害物からの測距値を関連付けなければならない課題がある [13]．そのため，複数の障害物が存在する環境に不向きである．

2.2.3 存在確率に基づく多辺測量

存在確率に基づく多辺測量 [10] では、各受信センサにおける全ての測距値に対して障害物存在確率を計算していく。そのため、複数の障害物が存在した場合でも受信センサ間の測距値の関連付け問題が発生しない。

存在確率は次のように定義する。 n 番目の受信センサから m 番目の障害物までの測距値 $\tilde{l}_{n,m}$ 、真の距離 $l_{n,m}$ 、受信機 n における測距誤差 ϵ_n の関係式は以下のように示せる。

$$\tilde{l}_{n,m} = l_{n,m} + \epsilon_n \quad (2.11)$$

上記の測距誤差 ϵ_n の分布を考慮し、測距値 $\tilde{l}_{n,m}$ が観測された時の障害物存在確率 $q_{n,m}(x, y | \tilde{l}_{n,m})$ をそれぞれの受信センサ n 、障害物 m に対して計算する。今回、測距誤差 (熱雑音) がガウス分布に従うと仮定した時、測距値 $\tilde{l}_{n,m}$ が観測された時の障害物存在確率 $q_{n,m}(x, y | \tilde{l}_{n,m})$ は以下の式 (2.12) ように計算できる。

$$q_{n,m}(x, y | \tilde{l}_{n,m}) = \frac{1}{2\pi\sigma_n^2} \exp \left\{ -\frac{(l_n(x, y) - \tilde{l}_{n,m} + \mu_n)^2}{2\sigma_n^2} \right\} \quad (2.12)$$

ここで、 μ_n 、 σ_n^2 は、それぞれ測距誤差 ϵ_n の平均値、分散を表しており、これらのパラメータは既知である。また、 x 及び y は確率変数であり、 $l_n(x, y)$ は、障害物が (x, y) に存在する場合における、原点に配置された送信機によって送信された音波が、障害物によって反射され、受信機 n によって受信されるまでの伝搬経路を表している。 $l_n(x, y)$ は以下のような数式 (2.13) により計算される。

$$l_n(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} + \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} \quad (2.13)$$

ここで、受信機 n の座標は (x_n, y_n) とする。

受信機 n において、1 個の障害物 m に対して、1 つの測距値 $\tilde{l}_{n,m}$ が得られていると仮定すると、2 つの観測値 $\tilde{l}_{n,m}$, $\tilde{l}_{n,m'}$ ($m \neq m'$) が共通の障害物から得られることはない。よって、この 2 つの事象は背反であるので、受信機毎に推定した障害物存在確率 $q_n(x, y)$ は、測距値 $\tilde{l}_{n,m}$ が観測された時の障害物存在確率 $q_{n,m}(x, y|\tilde{l}_{n,m})$ の総和により求められ、以下の式 (2.14) のように示せる。

$$q_n(x, y) = \sum_{m=1}^M q_{n,m}(x, y|\tilde{l}_{n,m}) \quad (2.14)$$

また、障害物 m に対して、それぞれの受信機によって計測された測距値 $\{\tilde{l}_{1,m}, \tilde{l}_{2,m}, \dots, \tilde{l}_{N,m}\}$ は互いに独立である。そのため、乗法の定理より、障害物存在確率は、以下の式 (2.15) のように、各受信機毎に推定した障害物存在確率 $q_n(x, y)$ の総乗により求められる。

$$Q(x, y) = \prod_{n=1}^N q_n(x, y) = \prod_{n=1}^N \sum_{m=1}^M q_{n,m}(x, y|\tilde{l}_{n,m}) \quad (2.15)$$

この障害物存在確率 $Q(x, y)$ の大小で障害物の位置を推定する。

この方式は、前述の多辺測量と異なり、障害物位置を確率的に推定するため、複数の障害物が存在する場合においても適用可能である。しかし、監視エリアに対して、受信センサの配置が偏っている場合、位置推定誤差が広がるという課題がある。図 2.5 にて、存在確率に基づく多辺測量による位置推定誤差範囲を図説する。それぞれの受信センサで推定した障害物存在確率 $q_{n,m}(x, y|\tilde{l}_{n,m})$ のピーク値座標は、図 2.5 の青色の領域に示すようになり、障害物存在確率 $Q(x, y)$ のピーク値座標は、図 2.5 の黄色のハッチング領域 (青色の領域の重複部分) のようになる。受信センサの配置が偏っている場合、それぞれの受信センサで推定した障害物存在確率 $q_{n,m}(x, y|\tilde{l}_{n,m})$ のピーク値座標の重複領域が同方向で広がるため、受信センサ配置方向に位置推定誤差が広がるという課題がある。そのため、受信センサの配置方向に対して誤差を低減できる位置推定アルゴリズムを検討する必要がある。

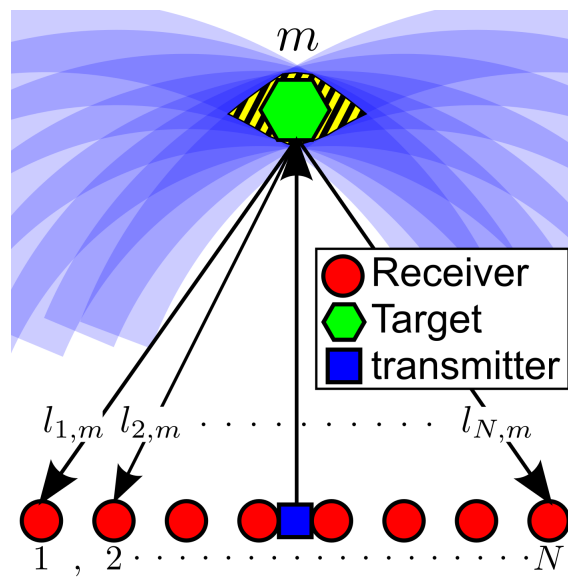


図 2.5: 存在確率に基づく多辺測量による誤差範囲 (黄色のハッチング領域)

第3章

提案手法

従来手法である存在確率に基づく多辺測量は、障害物存在確率が円弧状に広がり、位置推定精度が円弧方向に低いという問題点がある。そこで、提案手法では、円弧状の確率分布の広がりを低減するために、障害物の方向情報を多辺測量によって計算された存在確率に重み付けをすることを提案する。3.1節では、提案手法の位置推定の計算の流れについて説明し、3.2節以降では、計算の流れについての詳細を述べる。3.2節では、受信信号から、TDOA 値を推定する方法について説明する。そして、3.3節では、TDOA 値から、方向を推定する方法について説明し、3.4節では、多くの受信機ペアで推定された座標に対して、高い比重を付けるような重み付け関数について説明する。

3.1 システム構成

本研究では、従来研究 [10] と同様に、超音波センサアレイシステムを用いる。提案手法のシステムフローを図 3.1 に示す。提案手法では、従来の存在確率に基づく多辺測量により求めた障害物存在確率 $Q(x, y)$ に対して、受信機間の TDOA 値を基とした方向推定により計算された関数 $W(x, y)$ （以後、「重み付け関数」と呼ぶ）を重み付けることにより、障害物位置推定精度の向上を試みる。重み付け後の障害物

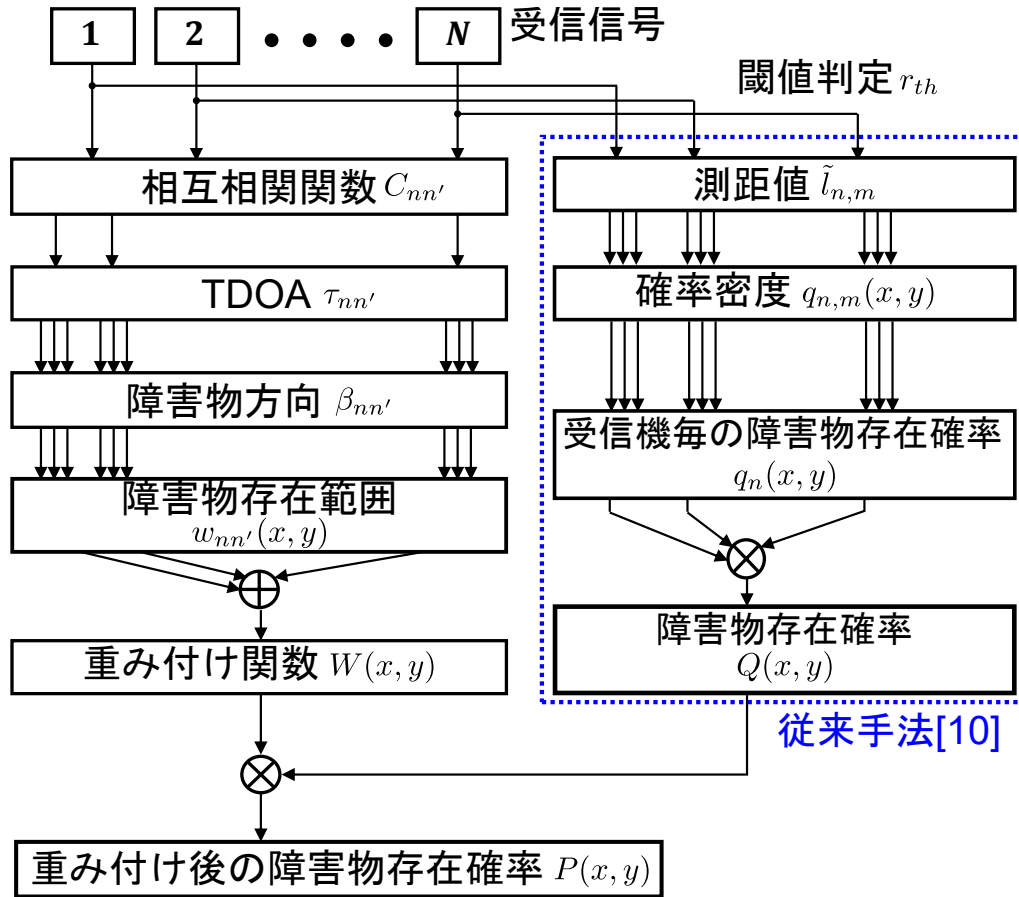


図 3.1: 提案手法におけるシステムモデル

存在確率 $P(x, y)$ は、以下の式 (3.1) ように示せる。

$$P(x, y) = W(x, y) \cdot Q(x, y) \quad (3.1)$$

重み付け関数 $W(x, y)$ の計算の概要について以下に述べる。まず、超音波センサアレイシステムによって、障害物からの反射波を N 個の受信機で受信し、全受信機ペア ($N C_2$ 通り) の受信信号間の相互相関関数 $C_{nn'}(\tau)$ を計算する。次に、相互相関関数 $C_{nn'}(\tau)$ に対して、閾値判定を行い、TDOA 値を推定する。次に、逆三角関数を用いて、TDOA 値から、障害物方向 $\beta_{nn'}$ を受信機ペア毎に推定する。次に、各受

信機ペアによって推定された障害物方向 $\beta_{nn'}$ を，極座標から直交座標に変換し，各受信機ペアによって推定された座標を $w_{nn'}(x, y)$ によって判定する．最終的に，全受信機ペアで推定された領域の尤度計算を行い，より多くのペアで推定された座標 (x, y) に，高い比重を持つ重み付け関数を計算する．

3.2 相互相関関数に基づく TDOA 計算

受信信号ペアの相互相関関数を計算することにより，TDOA 値を計算する．初めに， n 番目と n' 番目の受信機の受信信号 $r_n(t)$, $r_{n'}(t)$ の相互相関関数を計算する ($n < n'$)[18][19][20]．相互相関関数は次の式 (3.2) で示される．

$$C_{nn'}(\tau) = \int r_n(t)r_{n'}(t + \tau)dt \quad (3.2)$$

ここで， τ は時間シフトを表す．2つの受信機間の距離を $d_{nn'}$ ，受信機 n' を基準とした受信機 n の TDOA 値を $\tau_{nn'}$ とすると，三角形の成立条件より，以下の不等式 (3.3) が成立する．

$$-d_{nn'} \leq c\tau_{nn'} \leq d_{nn'} \quad (3.3)$$

そのため，式 (3.2) の相互相関関数の計算における時間シフト τ の定義域を (3.4) と設定する．

$$-\frac{d_{nn'}}{c} \leq \tau \leq \frac{d_{nn'}}{c} \quad (3.4)$$

障害物からの反射波は， n 番目受信機に $\tau_{nn'}$ だけ遅延されて受信されるため，音波が減衰なく伝搬されると仮定すると，2つの受信信号 $r_n(t)$, $r_{n'}(t)$ には，以下のような関係式 (3.5) が成立する．

$$r_n(t) = r_{n'}(t - \tau_{nn'}) \quad (3.5)$$

そのため、相互相関関数 $C_{nn'}(\tau)$ を最大化する τ は、TDOA 値 $\tau_{nn'}$ と等しくなる。最大値付近を検出するために、以下の式 (3.6) に示すような閾値判定によって、TDOA 値 $\tau_{nn'}$ を推定する。

$$\hat{\tau}_{nn'} = \{\tau | C_{nn'}(\tau) \geq \eta_C \cdot \max(C_{nn'}(\tau))\} \quad (3.6)$$

ここで、閾値は相互相関関数の最大値 $\max(C_{nn'}(\tau))$ に、相互相関関数の最大値に対する比 η_C を乗算したものである。閾値判定によって、相互相関関数が閾値を超過した時の時間シフト τ を TDOA 値として推定する。また、TDOA 値 $\tau_{nn'}$ に対して、音速 c を乗算することによって、伝搬経路差 $c\hat{\tau}_{nn'}$ が求まる。

3.3 受信機ペア毎の信号到来方向推定

節 3.2 にて、求めた伝搬経路差 $c\hat{\tau}_{nn'}$ から、受信機ペアに対する障害物方向 $\beta_{nn'}$ を推定する。前提条件として、図 3.2 のように、2つの受信機 n と n' に対して、障害物からの反射波が平行に到来する場合を仮定する。この時、逆三角関数を用いた以下のような式 (3.7) によって、障害物方向 $\beta_{nn'}$ を求めることができる [21][22][23]。

$$\hat{\beta}_{nn'} = \cos^{-1} \left(\frac{c\hat{\tau}_{nn'}}{d_{nn'}} \right) \quad (3.7)$$

3.4 障害物方向情報に基づく重み付け関数 $W(x, y)$

3.2 節, 3.3 節では、相互相関関数の計算、閾値判定による TDOA 値の推定、障害物方向の推定といった、各受信機ペアによる信号処理の流れについて説明した。しかし、相互相関関数を用いた TDOA 値の推定において、障害物が 1 個のみ存在する場合は問題ないが、複数個存在する場合は、異なる障害物からの反射信号の相関波

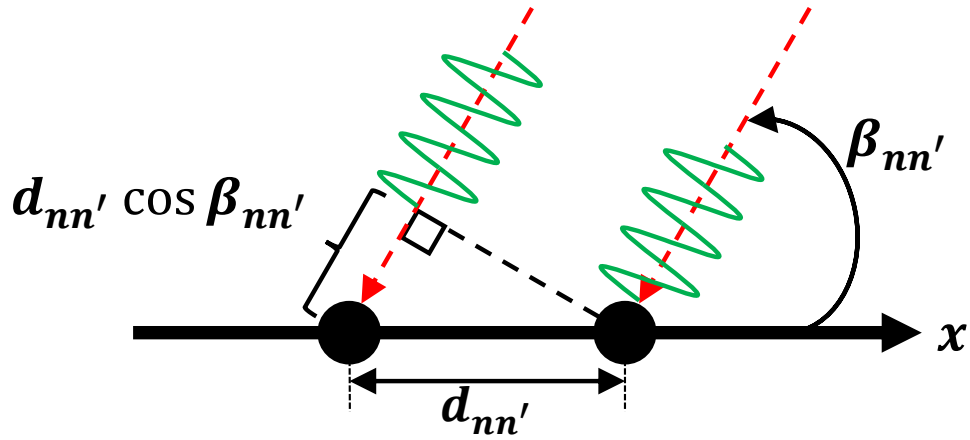


図 3.2: 受信機 n, n' での到来方向推定

形が発生するため、推定した TDOA 値に誤りが発生する場合がある。

TDOA 値の誤り発生メカニズムについて、2つの受信機 (受信機 n と受信機 n') に対して、2つの障害物 m, m' からの反射波が返ってくる場合を例に挙げて説明する。図 3.3 に示すように、受信信号 $r_n(t), r_{n'}(t)$ には、それぞれ、障害物 m からの反射波と障害物 m' からの反射波の二波が含まれている。受信機 n に障害物 m からの反射波が到来した時刻を t_{nm} と表記すると、相互相関関数 $C_{nn'}(\tau)$ を最大化する τ は、 $t_{nm} - t_{n'm'}$, $t_{nm} - t_{n'm}$, $t_{nm'} - t_{n'm'}$, $t_{nm'} - t_{n'm}$ の4値となる。しかし、 $t_{nm} - t_{n'm'}$, $t_{nm'} - t_{n'm}$ は、異なる障害物からの反射波の相関ピークとなるため、TDOA 値 $\tau_{nn'}$ としては誤りである。

相互相関を最大化する τ の値を一般化すると、以下のようになる。

$$\tau = \{t_{nm} - t_{n'm'} | 1 \leq m \leq M, m \in N, 1 \leq m' \leq M, m' \in N\} \quad (3.8)$$

ここで、 M, N はそれぞれ障害物個数、受信機個数であり、 m, m' は $m \neq m'$ を満たす2つの障害物の番号ある。このように、相互相関関数のピーク点の数は、TDOA の真値の数よりも多くなるため、1対の受信機ペアによる推定で、障害物方向を完

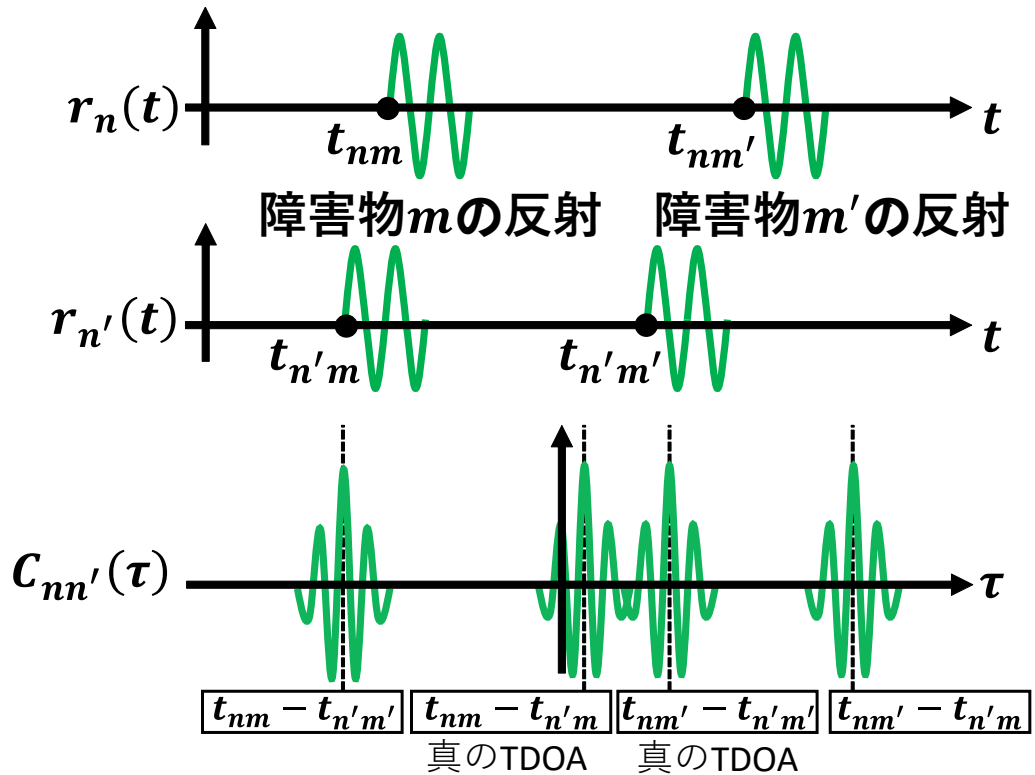


図 3.3: マルチターゲット環境における TDOA 値の推定

全に推定することはできない。

そのため、本提案手法では、全受信機ペアによって障害物位置を推定することを検討する。まず、3.3 節にて推定した障害物方向 $\beta_{nn'}$ を直角座標に変換し、その座標を受信機ペア n, n' で推定した障害物存在範囲 $w_{nn'}(x, y)$ として、次の式 (3.9) のように定義する。

$$w_{nn'}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x, y) = (r \cos \beta_{nn'}, r \sin \beta_{nn'}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.9)$$

ここで、 r は任意の実数とする。さらに、上式を受信機 n, n' のみではなく、全受信

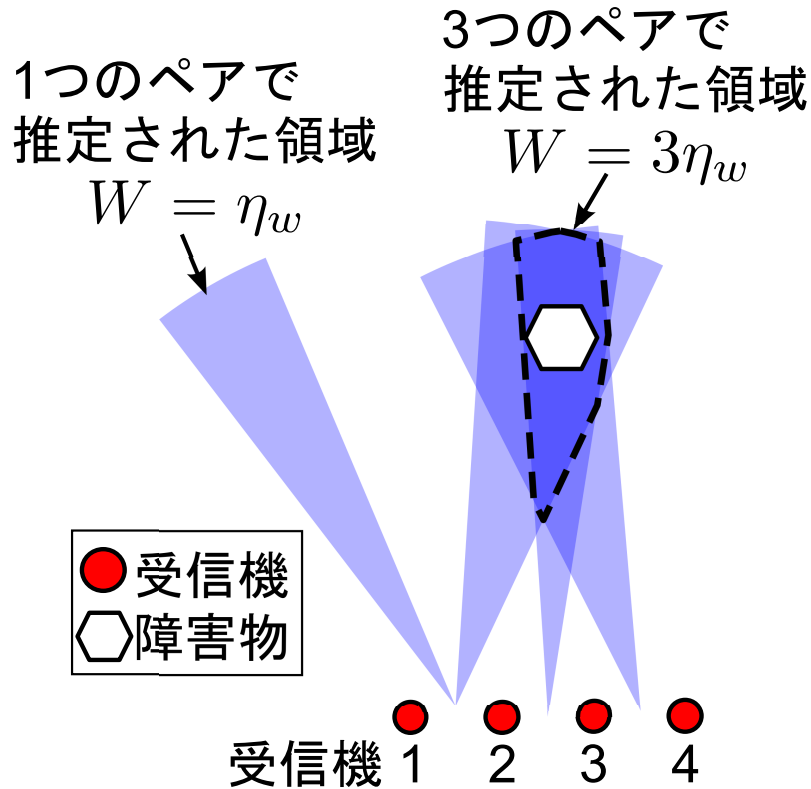


図 3.4: 重み付け関数の例

機ペアの障害物存在範囲の総和を考える.

$$W(x, y) = \eta_w \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{n'=n+1}^N w_{nn'}(x, y) \quad (3.10)$$

ここで, η_w は $W(x, y)$ の重積分値が1になるような, 正規化係数とする. この $W(x, y)$ について, 図 3.4 に示すような, 4つの受信機によって障害物位置を推定することを例に挙げて説明する. 障害物1個に対して4個の受信機が存在している. 扇状のエリアはある受信機ペアで求められた $(x, y) | w_{nn'}(x, y) = 1$ の座標を表記している. 受信機ペア (1, 2) における障害物存在範囲 $w_{12}(x, y)$ が, 障害物方向と誤方向の二方向に推定されており, その他の受信機ペア (2, 3), (3, 4) では, 障害物方向を正しく推定できているという状況である. この時, 図 3.4 内の障害物が存在する領域 (破線

部分) の重みは $W(x, y) = 3\eta_w$ 受信機ペア (1, 2) によって誤って推定された領域の重みは $W(x, y) = 1\eta_w$ となる.

このように, 各受信機ペアで推定した領域に誤りが含まれていたとしても, 全受信機ペアの推定領域の尤度を式 (3.10) のように計算することで, 障害物付近の領域に高い重みを設定することができる. このような計算により導出された $w(x, y)$ を重み付け関数として式 (3.1) のように従来手法に適用することで, 提案手法は精度向上を狙う.

第4章

特性評価

提案手法と従来手法を計算機シミュレーションによる特性評価で比較する。4.1節では、シミュレーション環境において用いる諸元を説明する。4.2節では、今回の研究で用いる評価指標を定義づける。4.3節では、設定した評価指標に基づいて、提案手法と従来手法を数値評価する。

4.1 シミュレーションモデル

シミュレーション内容を、表4.1に示す。まず、障害物存在確率分布マップを従来と提案で比較する。その後、障害物個数が1個の場合、そして複数個の場合を評価する。さらに、信号対雑音比 (SNR: Signal to Noise power Ratio) を変化させた時についてもシミュレーションを行い、受信信号における雑音の影響についても評価する。一般に、 SNR と信号振幅 A_s の関係式は以下の式(4.1)のように与えられる。

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_s}{\sigma^2} \right) = 20 \log \left(\frac{A_s}{\sqrt{2}\sigma} \right) \quad (4.1)$$

ここで、 P_s は信号パワー、 σ は雑音の標準偏差を表す。今回、雑音の分散値は $\sigma^2 = 10$ を用いて、信号振幅 A_s を SNR の設定値に応じて変化させる。式(4.1)に基づいて、今回設定する SNR 値に対する信号振幅 A_s を計算した結果を以下の表4.2に示す。評価指標を用いて数値評価し、性能比較する。

表 4.1: シミュレーション内容

シミュレーション条件	配置座標	評価
(1) 障害物確率分布の 数値例	(0, 7), (3, 6)	従来手法及び提案手法の 確率分布カラーマップ
	(0, 2), (1, 2)	
(2) 障害物 1 個	全配置パターンを 1 回ずつ試行 ($K = 161 \times 161$ 回)	検出面積
(3) 障害物 2~5 個	10000 回ランダムな 座標に配置	最大確率に対する比 vs 検出面積
(4) ノイズ付加 障害物 2~5 個		最大確率に対する比 vs 検出成功率 検出成功率 vs 検出面積

表 4.2: SNR[dB] に対する信号振幅 A_s [V](ノイズ分散 $\sigma^2 = 10$)

SNR[dB]	信号振幅 A_s [V]
6	8.92
8	11.23
10	14.14

また、シミュレーション諸元を表 4.3 に示す。送信素子、受信機の配置は従来の超音波センサアレイシステムによって設定されている値を用いる。また、相互相関関数のピーク値を最大化するために、送信信号として正弦波のバースト波を用いる。正弦波周波数 $f = 45\text{kHz}$ に対して、標本化の定理を満たすサンプリング周波数として $f_s = 96\text{kHz}$ を設定した。また、今回のシミュレーションでは、送信機から発した波が受信機に伝搬減衰なく到達すると仮定する。また、センサ監視領域 D の y 座標

表 4.3: シミュレーション諸元

送信素子の信号振幅 [V]	V	30
送信素子数		8
送信信号の周波数 [kHz]	f	45
送信信号の長さ		9 波長分
音速 [m/s]	c	340.5(気温が 15°C の時の音速の理論値)
サンプリング周波数 [kHz]	f_s	96
受信機の個数	N	8
受信機の配置間隔 [m]	d	0.15
受信機の x 座標 [m]	\mathbf{x}_r	$[\pm 0.525, \pm 0.375, \pm 0.225, \pm 0.075]$
FAR		0.01
最大相互相関関数 に対する比	η_C	0.4
位置推定におけるグリッド幅 [m]	g_w	0.05
センサ監視領域 [m ²]	D	x 座標 [-8,8] y 座標 [0,16]
障害物配置範囲 [m ²]		x 座標 [-4,4] y 座標 [0,8]
事前計測された 測距値の分散値 [m ²]	σ^2	$[0.0101, 0.0109, 0.0100, 0.0110,$ $0.0119, 0.0123, 0.0092, 0.0155]$

$0 \leq y \leq 16$ としており、超音波センサアレイシステムの前方のみを観測する。今回、式 (2.12) によって計算される障害物存在確率 $Q(x, y)$ において、用いる測距誤差 ϵ_n の平均値 μ_n は 0、分散値 σ_n^2 は実験によって得られた受信波形データに基づき設定する。

4.2 評価指標

今回用いる評価指標について述べる。障害物を検出するために、障害物存在確率 $Q(x, y)$ 及び、重み付けられた障害物存在確率 $P(x, y)$ に対して閾値判定を行う。また、障害物存在確率の正確性及び精度を評価するための評価指標として、検出面積 S 、障害物検出成功率 P_{succ} を用いる。各評価指標を以下のように定義する。

- 検出面積 S を定義する。この指標は、確率分布の精度を示す指標であり、障害物存在確率に対して閾値判定を行い、閾値より高い確率を持つグリッド面積を障害物個数で除算した値を表す。以下のような数式 (4.2) によって定義される。

$$S(k) = \frac{1}{M} \iint_D S_d(x, y) dx dy \quad (4.2)$$

上式において、 k はシミュレーション回数のインデックス、 M は配置した障害物個数、 D はセンサの監視領域を表す。また、 $S_d(x, y)$ は閾値判定による障害物存在確率の二値化であり、以下のような数式 (4.3), (4.4) によって定義される。

- 従来手法の障害物存在確率 $Q(x, y)$ に対する閾値判定

$$S_d(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } Q(x, y) > \eta_Q \cdot \max(Q(x, y)) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.3)$$

- 提案手法の重み付けられた障害物存在確率 $P(x, y)$ に対する閾値判定

$$S_d(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } P(x, y) > \eta_P \cdot \max(P(x, y)) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.4)$$

ここで、 η_Q , η_P はそれぞれ、従来および提案手法の最大障害物存在確率に対する比とする。

- 検出成功率 P_{succ} を以下に定義する。この指標は、障害物検出の正確性を示しており、検出領域内に障害物が存在する確率を表している。以下の数式 (4.5) によって定義される。

$$P_{succ}(k) = \frac{M_{succ}(k)}{M} \quad (4.5)$$

ここで、 $M_{succ}(k)$ は、 k 回目の試行における障害物の検出数を表している。また、以下の等式 (4.6) を満たす時を障害物検出成功の定義とする。

$$S_d(x_m, y_m) = 1 \quad (4.6)$$

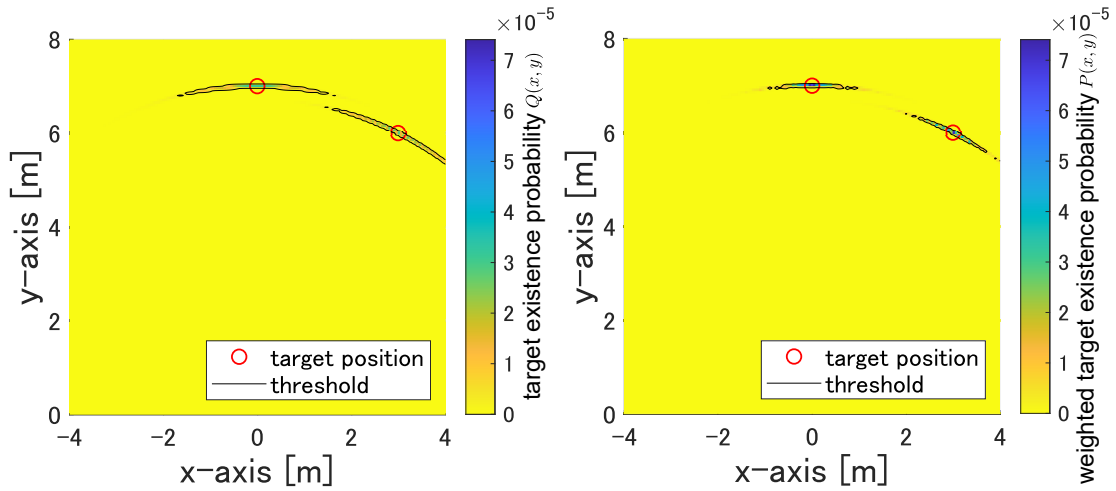
ここで、 (x_m, y_m) は、障害物の座標を表す。

4.3 評価結果

従来手法における障害物存在確率分布 $Q(x, y)$ と提案手法における重み付けられた障害物存在確率分布 $P(x, y)$ を確率分布マップ、検出面積、検出成功率の観点から比較する。また、障害物個数を変化させた時、SNR を変化させた時についても検討する。

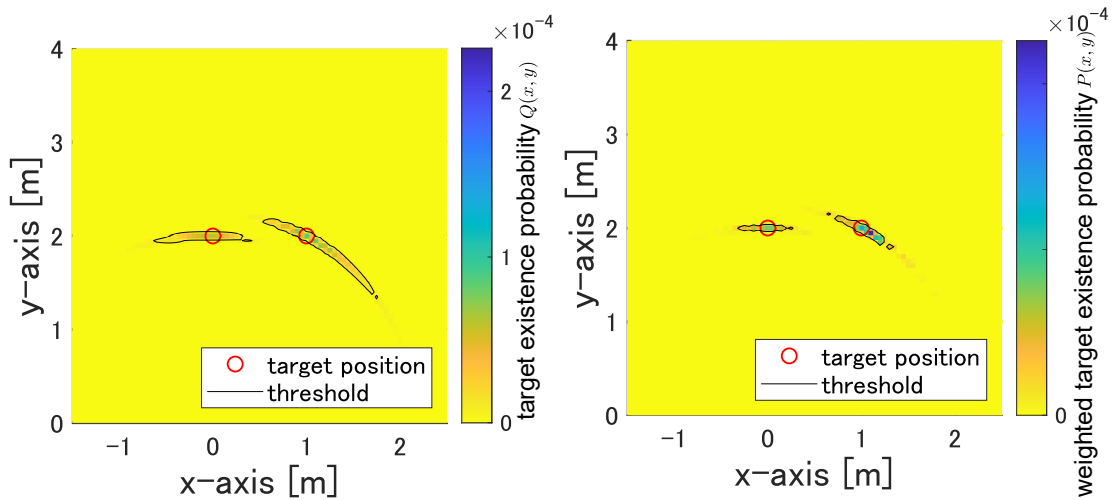
4.3.1 障害物存在確率分布の数値例

確率分布の数値例として、障害物 2 個を送信機の遠距離座標 ((0,7) と (3,6)) に配置した場合と送信機の近距離座標 ((0,2) と (1,2)) に配置した場合の 2 通りの配置についてシミュレーションを行う。2 通りの配置に対する従来手法と提案手法の障害物確率分布のシミュレーション結果を図 4.1(a)~4.2(b) に示す。また、図中に示す閾値の最大確率の比は $\eta_Q = \eta_P = 0.1$ を用いており、閾値を黒い実線で示している。



(a) 障害物存在確率 $Q(x, y)$ (従来) (b) 障害物存在確率 $P(x, y)$ (提案)

図 4.1: 障害物存在確率分布例 (障害物位置 (0,7), (3,6))



(a) 障害物存在確率 $Q(x, y)$ (従来) (b) 障害物存在確率 $P(x, y)$ (提案)

図 4.2: 障害物存在確率分布例 (障害物位置 (0,2), (1,2))

この黒い実線で囲まれた領域面積が検出面積 S となる。これらの図から、遠距離障害物、近距離障害物どちらの場合においても、従来よりも提案手法の方が検出面積 S が小さいことが確認できる。そのため、従来手法と比較して提案手法は障害物

位置推定精度が高いと言える。

4.3.2 障害物を1個配置した場合の数値評価

障害物1個をセンサ監視領域内に走査的に配置した時のシミュレーションを行う。

図4.3(a), 4.3(b), 4.4は, xy 軸で障害物の配置座標 (x_m, y_m) を表しており, z 軸でそれぞれ, 従来手法における検出面積 S , 提案手法における検出面積 S , 従来手法における検出面積と従来手法における検出面積の差 (図4.3(a)と4.3(b)の z 軸の差) のシミュレーション結果を表している。また, 図4.3(a)と4.3(b)の z 軸の大小関係とその割合を表4.4に示す。

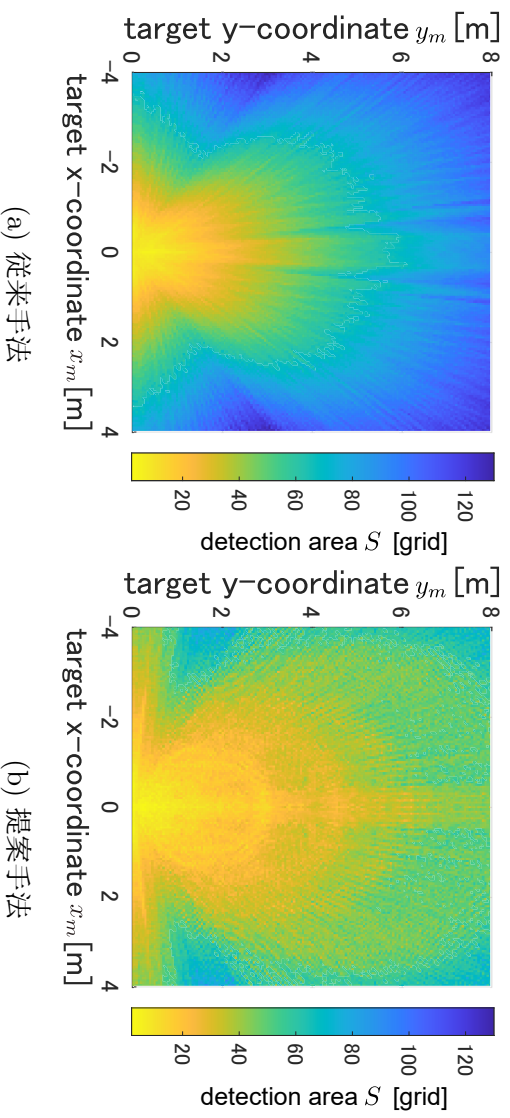


図 4.3: 障害物の配置 (x_m, y_m) に対する検出面積 S

表 4.4: 図 4.3(a) と図 4.3(b) の z 軸比較

図 4.3(a) と図 4.3(b) の z 軸の大小関係	グリッド数 [grid]	割合 [%]
従来手法の検出面積 > 提案手法の検出面積	25782	99.46
従来手法の検出面積 = 提案手法の検出面積	53	0.21
従来手法の検出面積 < 提案手法の検出面積	86	0.33
合計	161×161	100

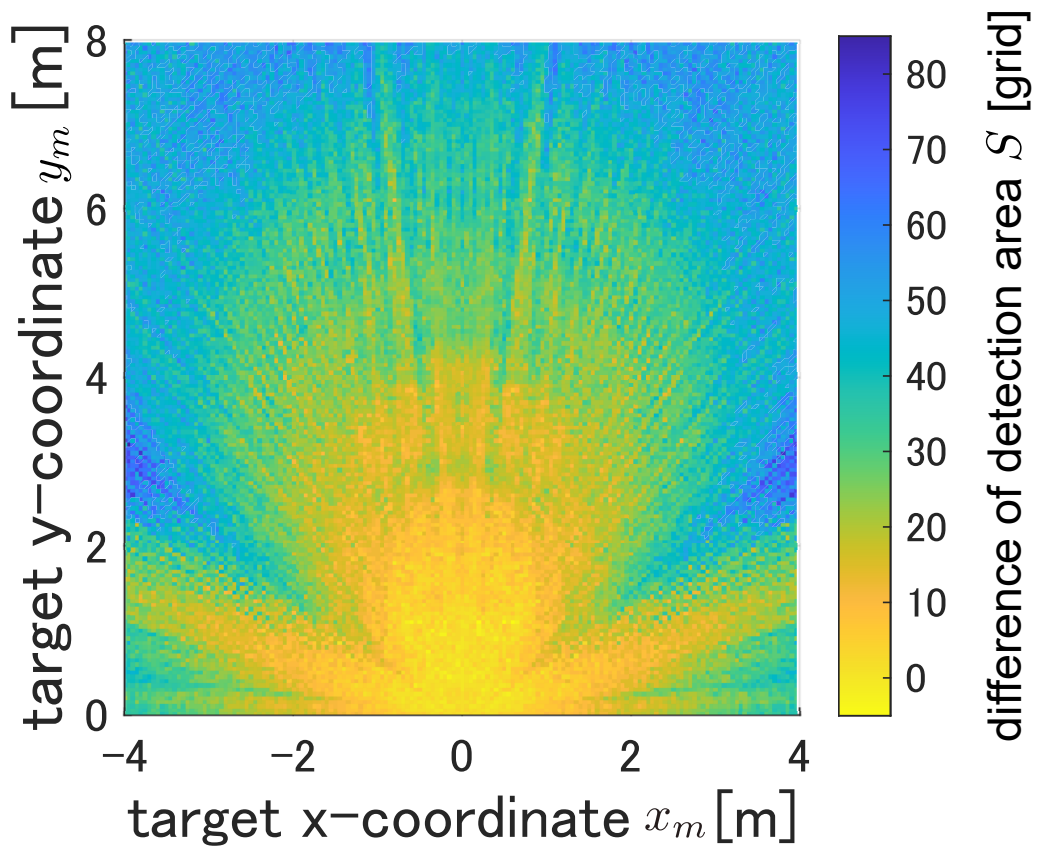


図 4.4: 従来手法と提案手法の検出面積 S の差

これらの結果より、共通の確率分布閾値の最大確率に対する比を用いた時に、ほとんどの障害物配置 (99% 以上の障害物配置) に対して、提案手法が有効かつ、大幅に検出面積が改善できることが分かる。

4.3.3 障害物を複数個配置した場合の数値評価

障害物 2 個以上の場合、障害物確率分布のピーク値が複数発生することが予測されるため、障害物 1 個の場合よりも複雑な環境である。また、障害物 2 個以上の場合において、全ての配置パターンを検証するのは、膨大な計算時間がかかる。そのため、センサ監視領域内にランダムに障害物を 10000 回配置し、評価指標のシミュレーション回数平均を求めることにより評価する。図 4.5 では、確率分布閾値の最大確率に対する比に対する平均検出面積 \bar{S} を示しており、4.6 では、確率分布閾値の最大確率に対する比に対する平均障害物検出成功率 \bar{P}_{succ} を示している。凡例として、提案手法を実線、従来手法を破線で表記する。これらのシミュレーション結果から、共通の最大確率に対する比を用いる時、提案手法は従来手法と比較して、精度は向上していることが確認できたが、正確性は低下している。

そこで、任意の障害物検出成功率を達成する閾値を用いた時の平均検出面積を求めたのが、図 4.7 となる。これにより、等しい正確性での従来手法と提案手法の比較ができる。この結果より、障害物個数 2 個と 3 個の場合において、従来と提案の性能はほとんど変わらず、障害物個数が 4 個と 5 個の場合において、従来以上の検出面積を狭めることができた。また、障害物個数が増えるにつれて、障害物間の確率分布が重複するため、検出面積 S は小さくなっていることが確認できる。

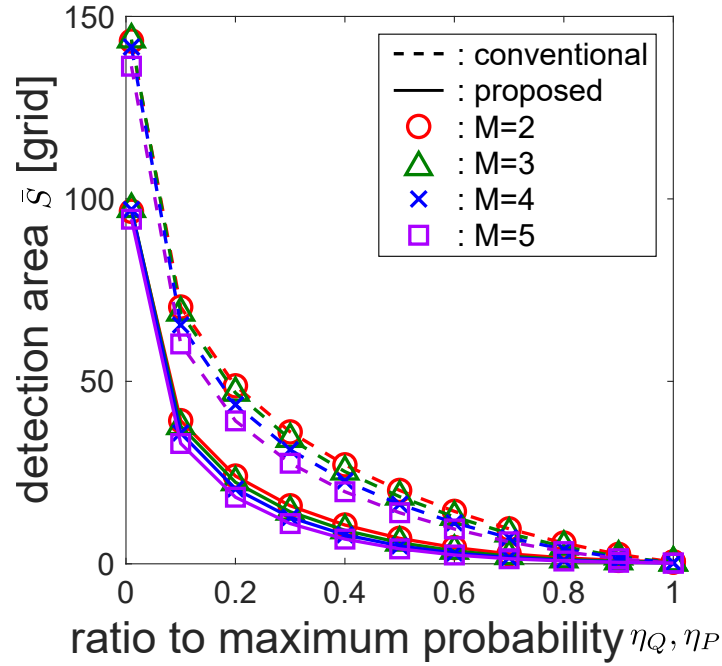


図 4.5: 最大確率の比 η_Q, η_P に対する平均検出面積 \bar{S}

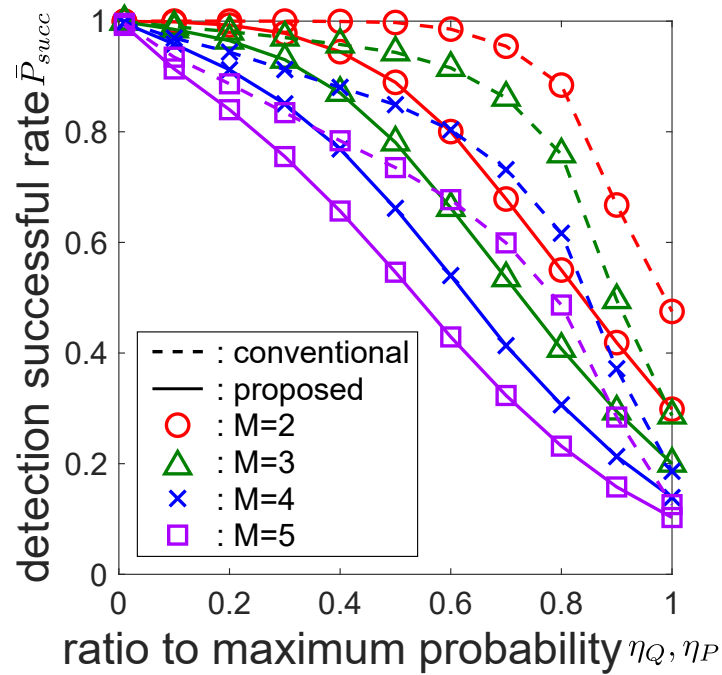


図 4.6: 閾値の最大確率に対する比 η_Q, η_P に対する平均障害物検出成功率 \bar{P}_{succ}

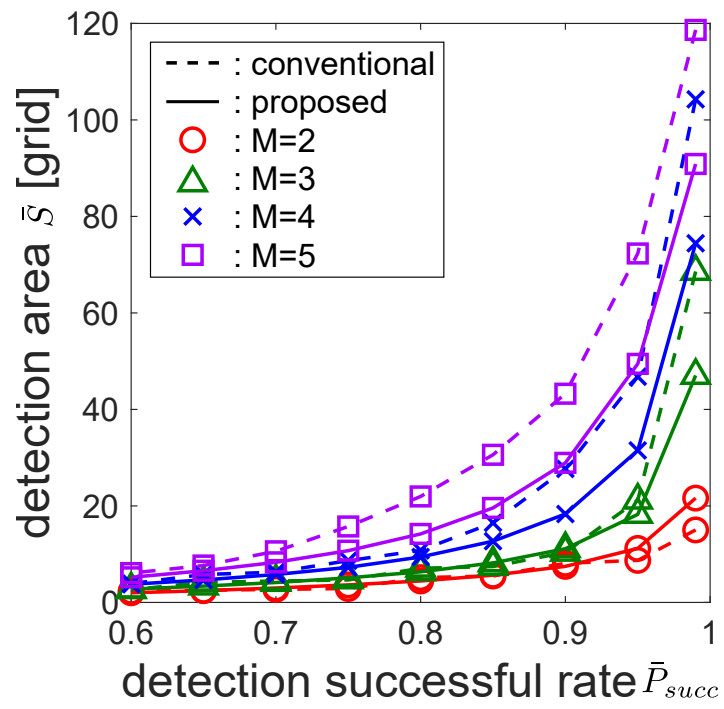
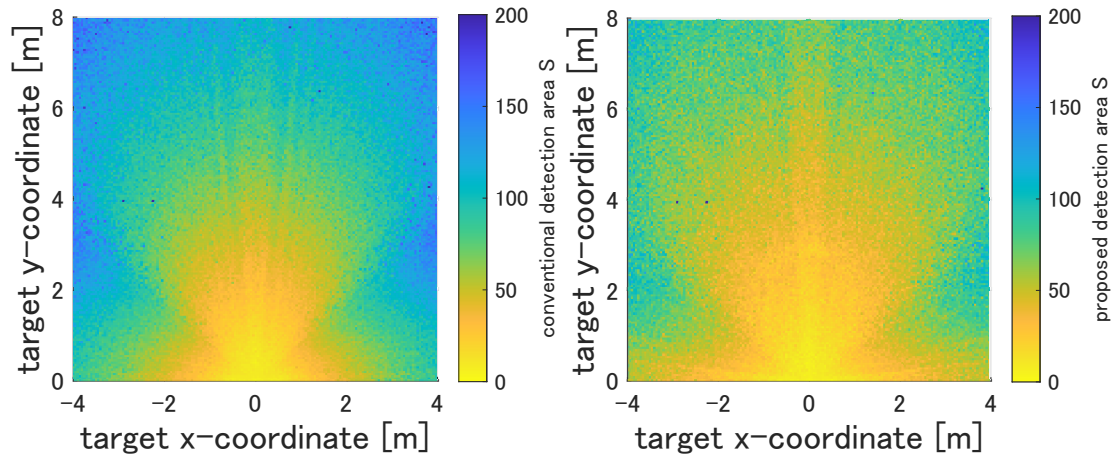


図 4.7: 平均障害物検出成功率 \bar{P}_{succ} に対する平均検出面積 \bar{S}

4.3.4 雑音を付加した時の数値評価

前項 4.3.1~4.3.3 では、無雑音環境についてのシミュレーションを行った。しかし、実環境においては、受信信号はクラッタや熱雑音などのランダムな外乱を含んでいる。そこで、ガウス分布に基づく熱雑音(今回は、平均値 0[V], 分散値 10[V²])が付加される場合を考慮し、シミュレーションを行う。信号閾値は、誤警報確率は 0.01 となるように、CFAR 法によって設定する。

まず、障害物 1 個について特性を評価する。SNR 値は、8[dB] と設定する。図 4.8 は障害物の配置に (x_m, y_m) に対する検出面積 S を示しており、図 4.8(a) は従来手法、図 4.8(b) は提案手法である。また、図 4.9 は従来手法と提案手法の検出面積差(図 4.8(a) と図 4.8(b) の z 軸の差)である。また、表 4.5 は、図 4.8(a) と図 4.8(b) の z 軸の大小関係とその割合を示す。これらの結果より、全配置の 99.1[%] の配置で従来手法よりも提案手法の方が高精度な位置推定が実現されている。また、検出面積差の最小値は、 $-10[\text{grid}](0.025[\text{m}^2])$ となっており、従来手法の方が提案手法よりも高精度である配置に関しても、提案手法の精度はあまり劣化しないことが確認できる。これらから、提案手法は、雑音環境下でも、従来よりも堅牢なアルゴリズムが実現できたと言える。



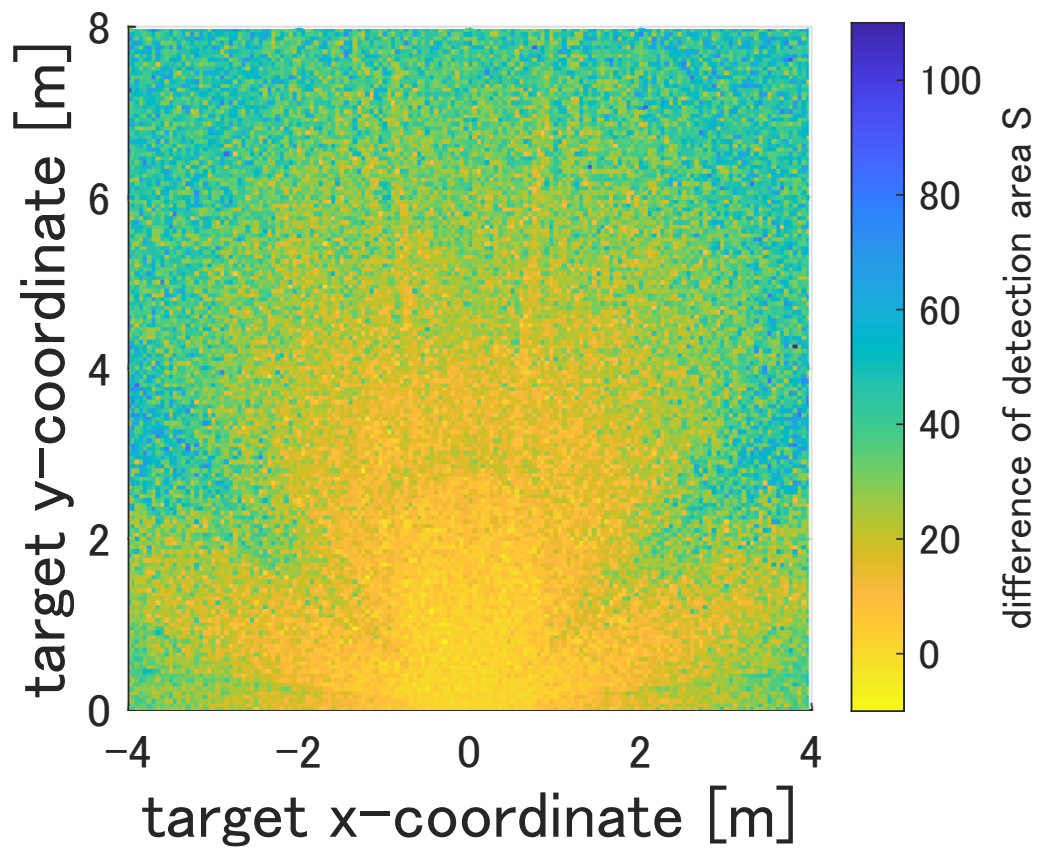
(a) 従来手法

(b) 提案手法

図 4.8: 雑音環境における障害物の配置 (x_m, y_m) に対する検出面積 S

表 4.5: 図 4.8(a) と図 4.8(b) の z 軸比較

図 4.8(a) と図 4.8(b) の z 軸の大小関係	グリッド数 [grid]	割合 [%]
従来手法の検出面積 > 提案手法の検出面積	25687	99.10
従来手法の検出面積 = 提案手法の検出面積	120	0.46
従来手法の検出面積 < 提案手法の検出面積	114	0.44
合計	161×161	100

図 4.9: 雑音環境における従来手法と提案手法の検出面積 S の差

次に、障害物が複数存在する場合について特性を評価する。SNR= 10, 8, 6[dB] に設定した時の、平均障害物検出成功率 \bar{P}_{succ} に対する平均検出面積 \bar{S} のシミュレーション結果をそれぞれ図 4.10~4.12 に示す。また、また、障害物検出成功率が $\bar{P}_{succ} = 0.9$ である時の、SNR に対する平均検出面積 \bar{S} を図 4.13 に示す。SNR= 10, 8[dB] に設定した時、提案手法は、従来手法以上の性能を発揮している。また、図 4.13 より、SNR 値が低くなるにつれて、従来手法と提案手法は、共に平均検出面積 \bar{S} が大きくなっている。これは、SNR 値が低くなると、受信信号に対する閾値判定における反射信号の検出確率が低下するためであると考えられる。

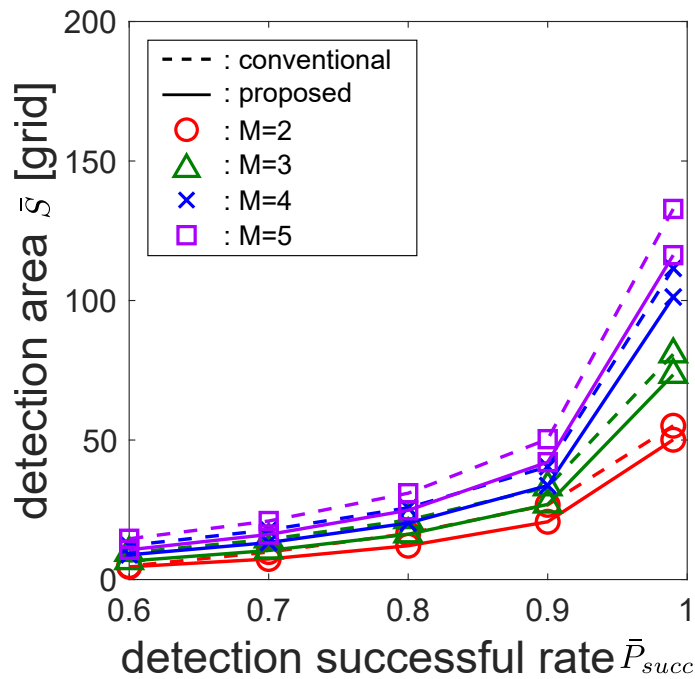


図 4.10: 平均障害物検出成功率 \bar{P}_{succ} に対する平均検出面積 \bar{S} (SNR=10[dB])

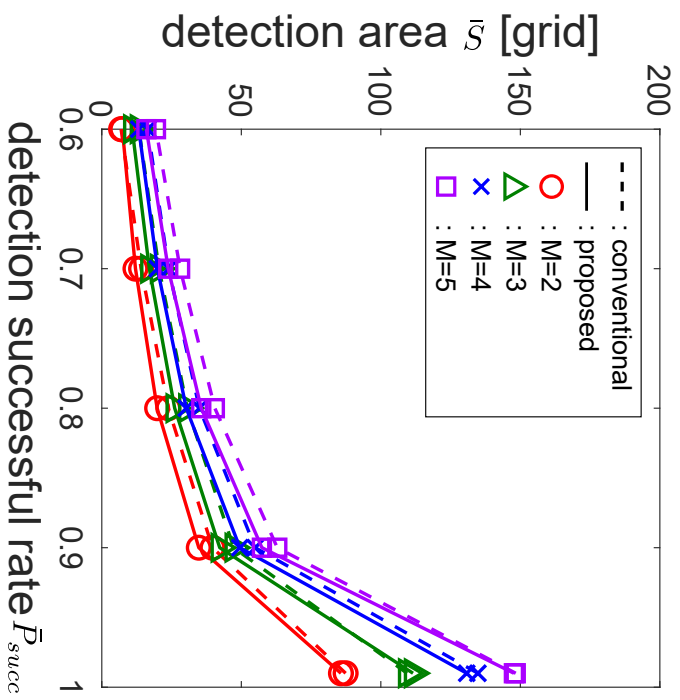


図 4.11: 平均障害物検出成功率 \bar{P}_{succ} に対する平均検出面積 \bar{S} (SNR=8 [dB])

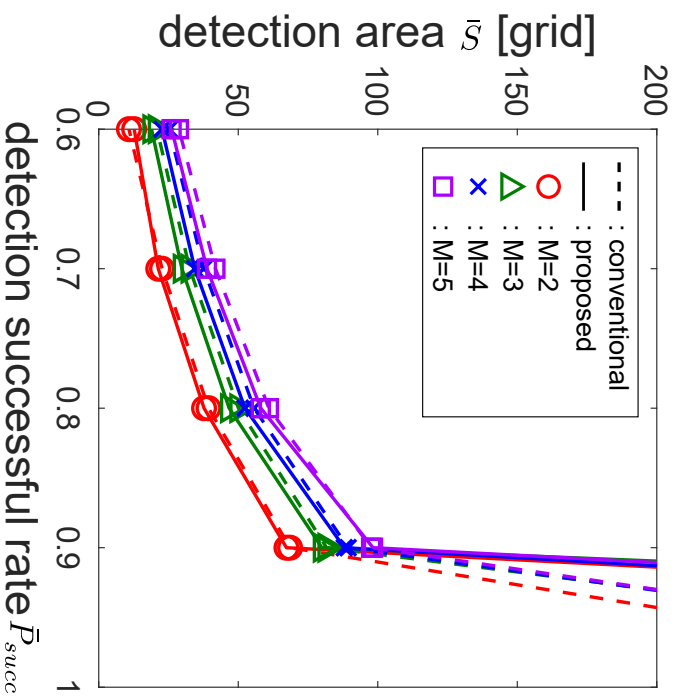


図 4.12: 平均障害物検出成功率 \bar{P}_{succ} に対する平均検出面積 \bar{S} (SNR=6 [dB])

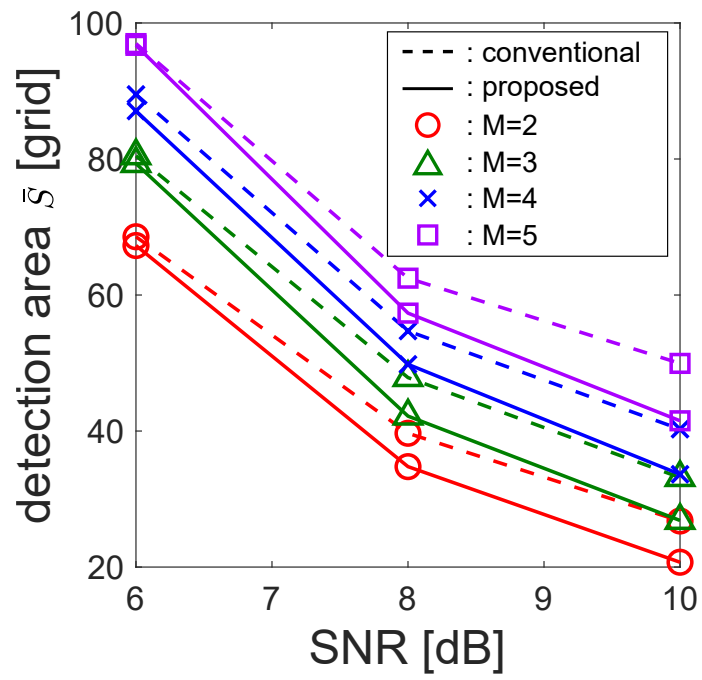


図 4.13: SNR 値に対する平均検出面積 \bar{S} (平均障害物検出成功率 $\bar{P}_{succ} = 0.9$)

第5章

まとめと今後の課題

本論文では，超音波センサレイシステムにおける障害物位置推定アルゴリズムに着目し，より高精度な位置推定を実現させるための研究を行った．従来では，超音波センサレイシステムにおいて，障害物存在確率を用いた多辺測量アルゴリズムが用いられており，複数の受信機によって推定した障害物存在確率の総乗を求めることによって，高精度な位置推定が実現されていた．障害物の位置に対して，受信機が取り囲むように配置されていれば，多数の方向から障害物を観測できるため位置推定精度は高いが，自動車から前方の障害物を監視するため，ある一定の偏った観測方向から推定する必要がある．このような受信機配置が局所的な場合において，円弧方向に位置推定精度が低くなる．

そこで，本研究では，障害物位置推定精度を向上させるための手法として，各受信機ペアによって障害物方向を推定した後，それらの推定領域の集中度合を表す指標として，重み付け関数 $W(x, y)$ を提案した．これにより，従来では，伝搬経路長情報のみを位置推定に用いていたのに対して，提案では，全受信機ペアによって推定した方向情報も利用し，より高精度な位置推定アルゴリズムが実現できた．

特性評価として，複数の障害物が存在する場合も考慮し，障害物存在確率分布に対する閾値判定を基とした評価指標「検出面積」「検出成功率」を定義し，数値評価を行った．その結果として，共通の障害物検出成功率という条件下で，従来より

も小さい検出面積を達成することに成功した。これにより、提案手法は従来よりも位置推定精度が高いということが確認できた。また、相互相関関数を計算しているため、雑音に対する堅牢性も高いことが分かった。提案した位置推定アルゴリズムでは、従来手法の障害物存在確率に基づく多辺測量よりも高い位置推定精度を発揮しており、今後の自動運転分野における、障害物検出性能の向上に貢献できると考える。

今後の課題として、計算コストの削減が挙げられる。提案手法では、相互相関関数や障害物存在確率マップを用いているため、計算コストが高くなる傾向にある。しかし、車載センサにおける障害物検出には、即時性が要求されるため、計算コストの削減を行う必要がある。また、近距離の障害物において、従来手法は十分に高精度な障害物位置推定が達成されていたため、提案手法の方が精度が低下する場合があったため、今後、近距離誤差を低減する方式について検討する必要がある。また、今回はコンピュータシミュレーションによって熱雑音のみを考慮して、提案手法の性能を評価した。しかし、その他の外乱としてクラッタや空気抵抗、伝搬減衰なども考えられる。また、今回のシミュレーションでは、障害物が大きさを持たず、一つの障害物対し、反射点は一つであることを前提とした。しかし、実際の障害物は、大きさを持っており、一つの障害物に対して複数の反射点が存在する場合が考えられる。これらを考慮し、より現環境に近い環境での評価を行う必要がある。

参考文献

- [1] World Health Organization, “Global status report on road safety 2018: Summary,” pp.3–5, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2018.
- [2] T. Teixeira, D. Jung and A. Savvides, “Tasking networked CCTV cameras and mobile phones to identify and localize multiple people,” Proceedings of the 12th ACM international conference on Ubiquitous computing, pp.213–222, Sep. 2010.
- [3] S.E. Reutebuch, H.E. Andersen and R.J. McGaughey, “Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory,” Journal of Forestry, vol.103, no.6, pp.286–292, Sep. 2005.
- [4] P. Bahl, V.N. Padmanabhan, “RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system,” Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, pp. 775–784, Mar. 2000.
- [5] H.C. Chieh, H. Polly, “Two practical considerations of beacon deployment for ultrasound-based indoor localization systems,” Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks, pp.306–311, Jun. 2008.

- [6] T. Javed, “Enabling Indoor Location-based Services Using Ultrasound,” Master of Science, School of Computing, Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada, 2013.
- [7] G. Oguntala, R. Abd-Alhameed, S. Jones, J. Noras, M. Patwary and J. Rodriguez, “Indoor location identification technologies for real-time IoT-based applications: An inclusive survey,” *Computer Science Review*, vol.30, pp.55–79, Nov. 2018.
- [8] A. Savvides, C.C. Han and M.B. Strivastava, “Dynamic fine grained localization in ad-hoc networks of sensors,” *Proceedings of the International conference on mobile computing and networking*, pp.166–179, Jul. 2001.
- [9] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, “A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks,” *Proceedings of the IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol.11, no.1, pp.13–32, First Quarter 2009.
- [10] 西尾太斗, 辻井明日香, 笠島崇, 羽多野裕之, 山里敬也, “超音波センサアレイシステムによる検出距離伸長と障害物位置推定手法の実験的評価,” *電子情報通信学会総合大会*, A-4-13, p.42, Mar. 2019.
- [11] D.E. Manolakis, “Efficient solution and performance analysis of 3-D position estimation by trilateration,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol.32, no.4, pp.1239–1248, Oct. 1996.
- [12] A. Coluccia, A. Fascista, “A review of advanced localization techniques for crowdsensing wireless sensor networks,” *Sensors*, vol.19, no.5, p.988, Feb. 2019.

- [13] J. Neira, J. Tardos, “Data association in stochastic mapping using the joint compatibility test,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.17, no.6, pp.890–897, Dec. 2001.
- [14] J. E. Salt, H. H. Nguyen and N. H. Pham, “Probabilistic source localization based on time-of-arrival measurements,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol.8, no.7, pp.5881–5892, Apr. 2021.
- [15] H. Hatano, T. Mizutani, K. Sugiyama and Y. Kuwahara, “Target position estimation algorithm under corrupted measurement data for radar network systems,” *IEICE Transactions on Fundamentals*, vol. E95-A, no.1, pp.317–321, Jan. 2012.
- [16] H. Rohling, “Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-19, no. 4, pp.608-621, Jul. 1983.
- [17] J. T. Rickard, G. M. Dillard, “Adaptive detection algorithms for multiple-target situations,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, no.4, pp.338–343, Jul. 1977.
- [18] Y.T. Chan, K.C. Ho, “A simple and efficient estimator for hyperbolic location,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.42, no.8, pp.1905–1915, Aug. 1994.
- [19] J. Scheuing, B. Yang, “Disambiguation of TDOA estimation for multiple sources in reverberant environments,” *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol.16, no.8, pp.1479–1489, Nov. 2008.

- [20] Y. Lee, T. S. Wada and B.H. Juang, “Multiple acoustic source localization based on multiple hypotheses testing using particle approach,” Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, pp. 2722–2725, Mar. 2010.
- [21] Y. Tian, Q.S. Lian and H. Xu, “Mixed near-field and far-field source localization utilizing symmetric nested array,” Digital Signal Processing, vol.73, pp.16–23, Feb. 2018.
- [22] J. Liang, D. Liu, “Passive localization of mixed near-field and far-field sources using two-stage MUSIC algorithm,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol.58, no.1, pp.108–120, Jan. 2010.
- [23] Y. D. Zhang, S. Qin and M. G. Amin, “Near-field source localization based on sparse reconstruction of sensor-angle distributions,” Proceedings of the IEEE Radar Conference, pp.891–895, May. 2015.

謝辞

本研究を遂行するに当たり、ご多忙の中多大な御指導、御鞭撻を賜りました三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 羽多野裕之准教授、森香津夫教授、眞田耕輔助教に深く感謝申し上げます。

また、本研究を進める上で貴重な御助言、御助力を賜りました名古屋大学教養教育院教授 山里敬也先生および、日本特殊陶業 辻井明日香氏及び、笠島崇氏に心より深く感謝致します。

最後に、研究室の整備等で陰ながら支えて下さった山本好弘技術職員、ならびに本研究のため御助力を注いでくださいました大学院生の皆様方に深く感謝致します。

令和4年 森田 瑛一

研究業績

- E. Morita, H. Hatano, K. Sanada, K. Mori, A. Tsujii, T. Kasashima, T. Yamazato, “Estimation for direction of signal arrival for multiple ultrasonic sensors,” Proc. of the 10th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University (Research Area C), pp.71–72, Sept. 2020.
- E. Morita, H. Hatano, K. Sanada, K. Mori, A. Tsujii, T. Kasashima, T. Yamazato, “Estimation for direction of signal arrival based on area density of estimated lines for ultrasonic sensor array,” Proc. of the IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp.333–335, Oct. 2020.
- E. Morita, H. Hatano, K. Sanada, K. Mori, A. Tsujii, T. Kasashima, T. Yamazato, “Numerical evaluation of target positioning by using weighting functions for ultrasonic sensor array,” Proc. of the 11th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University (Research Area C), pp.37–38, Sept. 2021.
- 森田 瑛一, 羽多野 裕之, 眞田 耕輔, 森 香津夫, 辻井 明日香, 笠島 崇, 山里 敬也, “多辺測量に基づく障害物位置推定における推定精度向上手法,” 電子情報通信学会技術研究報告 (ITS 研究会), pp.202–207, 2022 年 2 月.