

博士学位論文

複数局協調型レーダを用いた  
生体センシングに関する研究

岩手大学大学院 理工学研究科  
システム創成工学専攻  
白木 信之

2022年3月

# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 高齢化社会の現状と見守りシステム	1
1.1.2 従来の見守りシステムとその課題	2
1.2 マイクロ波を用いた生体センシング手法	3
1.3 本研究の目的	5
1.4 本論文の構成	7
<b>第 2 章 複数局協調型 MIMO レーダを用いた測位法</b>	<b>9</b>
2.1 複数局協調型 MIMO レーダを用いた測位法の原理	9
2.2 ネットワークトポロジを考慮した複数協調型 MIMO レーダ	13
2.3 ネットワークトポロジによる測位性能の評価	14
2.3.1 レイトレース解析による生体経由の位相搬路のモデル化	14
2.3.2 シミュレーション条件	17
2.3.3 シミュレーション結果	18
2.4 多人数測位精度の評価	21
2.4.1 シミュレーション条件	21
2.4.2 シミュレーション結果	22
2.4.3 実験条件	25
2.4.4 実験結果	27
2.5 まとめ	30
<b>第 3 章 2次元座標重みづけ関数を用いた生体測位法</b>	<b>32</b>
3.1 2次元座標重みづけ関数を用いた生体測位法の原理	32
3.2 屋内実験室における生体測位精度の評価	33
3.2.1 実験条件	33
3.2.2 実験結果	35

3.3	まとめ	37
<b>第4章</b>	<b>重みづけ固有ベクトルを用いた生体測位法</b>	<b>39</b>
4.1	重みづけ固有ベクトルを用いた生体測位法の原理	39
4.2	屋内実験室における生体測位精度の評価	41
4.2.1	実験条件	41
4.2.2	実験結果	43
4.3	まとめ	47
<b>第5章</b>	<b>チャンネル時間応答線形予測と移動速度を考慮した生体位置追従法</b>	<b>48</b>
5.1	チャンネル時間応答線形予測と移動速度を考慮した生体位置追従法の原理	49
5.2	シミュレーションによる生体位置追従精度の評価	56
5.2.1	シミュレーション条件	56
5.2.2	シミュレーション結果	57
5.3	屋内実験室における生体位置追従精度の評価	58
5.3.1	実験条件	58
5.3.2	実験結果	63
5.4	まとめ	70
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>71</b>
	謝辞	74
	参考文献	75
	学術論文・外部発表	81

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

### 1.1.1 高齢化社会の現状と見守りシステム

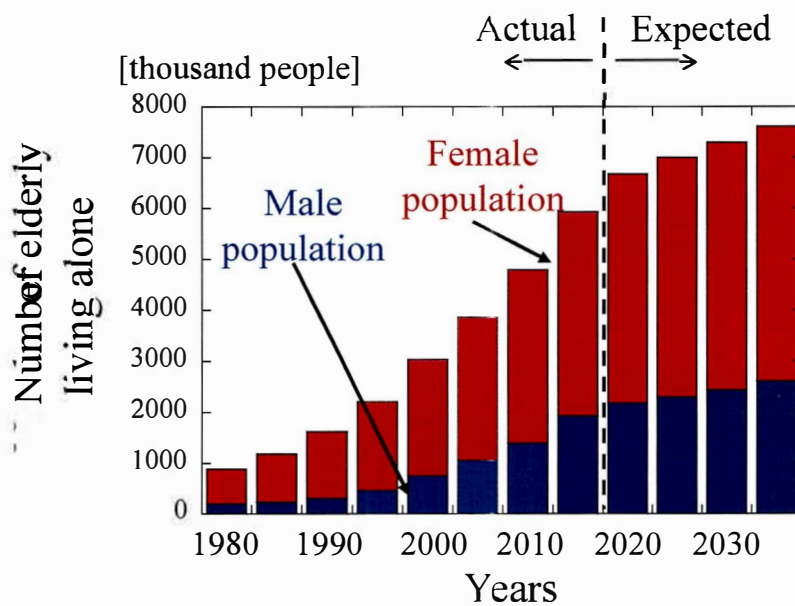


図 1.1: 一人暮らしの高齢者数の推移

現在、我が国は世界一の高齢化率を有している。図 1.1 に示すとおり、一人暮らしの高齢者数は年々増加している [1][2]。それに伴い、転倒や発作等の発見が遅れることによる孤独死が社会問題となっている。また、高齢者数が増加すると介護施設の入所者数も増加する。図 1.2 に介護職員の業務内容の内訳を示す [3]。介護職員の業務内容は食事や入浴の介助等の介護業務のほかに記録や見守りが 20% を占めており、これらの業務が無視できない量となっている。

上記の問題を解決する手段として見守りシステムの活用が有効である。一人暮らしの高齢者の異常を検知して介護者や家族へ通知することで迅速な対処が可能となる。また、介護施設において介護者、被介護者の位置等を推定、記録することで業務記録の負担を減少させ、真に異常を検知した場合にかけつけるこ



図 1.2: 介護職員の業務内容

とで見守りの回数を減少させることができる。

### 1.1.2 従来の見守りシステムとその課題

見守りシステムの主要要素として対象の位置の推定が挙げられる。高齢者施設においては、多数の介護者、被介護者を同時に検出する必要がある。また、対象位置を連続的に観測することで観測時間と推定位置の変化から対象の位置追従(トラッキング)が可能であるため、複数名を同時に観測可能で高精度な位置推定手法は見守りシステムに重要である。

従来の見守りシステムとしてウェアラブルデバイスによる位置推定法が提案されている [4]。スマートウォッチのような装着型のデバイスに搭載された加速度センサにより対象の位置推定およびトラッキングを行う。しかし、デバイスの装着による不快感や高齢者の装着忘れ、入浴時等の取り外し時には観測できない問題がある。

デバイスの装着が不要な技術としてビデオカメラによる見守りシステムが提案されている [5]-[7]。ビデオカメラによりモニタリングすることで高精度に対象の位置を推定可能となる。しかし、トイレや浴室等のプライバシーな空間では使用できない。さらに、机の下に倒れた対象のようにカメラから死角となる場所の観測ができない問題がある。

デバイスの装着が不要かつプライバシーを考慮した技術として赤外線センサを用いた手法が提案されている [8][9]。赤外線センサは人体が発する遠赤外線を検知することで対象の位置を推定する。しかし、赤外線センサは日光や気温変化に弱く、誤作動を起こす可能性がある。また、対象が赤外線センサ近くを通過することで検知することができるが、センサを設置した地点に推定範囲が限定される。推定範囲を限定

せずに対象の位置を推定するためには、多数のセンサを高密度に配置する必要がある。

これまでに挙げた問題に対し、LiDAR (Light Detection And Ranging) を用いた測位法が提案されている [10]。LiDAR は紫外線や赤外線等のレーザ光を照射し、対象や家具、壁等から反射し、戻るまでの時間から物体の距離と方向を推定する。これを連続的に行うことで移動する対象の距離と方向の時間変動を観測することで対象の位置を推定する。しかし、LiDAR は数万円と高価であり、家屋や介護施設の全範囲をカバーするには複数個必要であるため現実的ではない。また、カメラと同様に死角を生じる問題もある。

## 1.2 マイクロ波を用いた生体センシング手法

これらの問題に対して、マイクロ波を用いた生体センシング手法が検討されている [11]–[18]。マイクロ波を対象に照射し、対象により反射した信号を受信する。この受信信号から呼吸や心拍等の生体活動に起因する生体表面の時間的変動を検出し、生体センシングを行う。これらの手法では、マイクロ波を使用するため、プライバシーの侵害や気温変化等の影響による誤検出の問題が生じにくいという利点がある。また、マイクロ波は反射や透過により広範囲に伝搬するためカメラや LiDAR と比較し死角の低減が可能である。さらに、Wi-Fi の周波数帯を用いるため、スマートフォンや家電等に搭載されているアンテナを用いることで低価格にハードウェアを実現可能となる。しかし、介護施設における見守りシステムの運用を考慮すると移動する複数の介護者、被介護者を同時に検知する必要がある。

マイクロ波を用いた生体位置推定法として伝搬遅延時間情報を用いた手法が提案されている [19]。また、この技術を応用し複数名の位置を推定する検討が行われている [20]。送信機から送信された信号が対象で反射し受信機で受信するまでの時間より対象とアンテナとの距離を算出する。これを複数のアンテナを用いて行い、対象と複数アンテナとの距離関係から対象の位置を推定する。しかし、対象を高精度に推定するために 1.69 GHz (5.56 GHz~7.25 GHz) もの広帯域を使用する必要がある。さらに、家具や壁からの反射波と生体からの反射波を区別するため、事前に無人環境情報を取得する必要がある。そのため、家具等の配置が変化した際には無人環境情報の再取得が必要となる。

これに対して、狭帯域なマイクロ波を用いた生体センシング技術として MIMO (Multiple Input Multiple Output) システムを用いた研究・実用化が進んでいる。MIMO 技術は送受信機双方に複数アンテナを用いて複数の信号を同一周波数かつ同時送受信することで、伝送容量、周波数利用効率を増加させるシステムとして注目されている。MIMO の伝送特性は伝搬環境に強く依存し、伝搬環境の変化により大きく変動する。この特性を応用し、生体の位置等の検出に利用した MIMO センサの検討が行われている。MIMO システムを応用した多数の検討が行われており、その中で MIMO レーダを用いたセンシング技術が注目されている [21]–[31]。さらに、その中で DOD (Direction-of-Departure) / DOA (Direction-of-Arrival)

推定により高精度に位置が推定可能であることが確認されている [31]. しかし, MIMO レーダを屋内環境で使用する際には, ターゲットからの反射波に加え, 送受信機間の直接波や, 壁や家具等からの反射波といった不要波による推定精度の劣化が問題となる. この問題を解決する手法として FFT (Fast Fourier Transform) を用いる手法が提案されている [32]–[35]. FFT を用いる手法は MIMO レーダにより観測されたチャンネルをフーリエ変換し, 呼吸や心拍等の生体活動由来の周波数成分を抽出することで直接波や壁からの反射波を除去することで, 高精度な屋内位置推定が可能となる.

同手法には, 多人数測位の観点から 3 つの問題点がある. 1 つ目は, 対象数が多くなるとアンテナからみて前方の対象が後方対象をブロックし, 後方対象が死角となるために位置推定精度が劣化する問題である. 2 つ目は, 対象がアンテナ局から離れるほど測位精度が劣化する問題である. 電波は距離の 2 乗に比例して減衰するため, アンテナ局から遠くなると測位精度が劣化し, さらに遠くなると観測不可となる. 3 つ目は, 同手法で使用される MUSIC (Multiple Signal Classification) 法 [36] では, 観測範囲内の対象数が既知である必要がある問題である. 対象数を推定する手法として波数推定法 [37]–[40] や人数推定 [41]–[48] 法が検討されているが対象 3 名時の推定成功率が 75% 程度であり, 4 回に 1 回は推定が正しい位置の推定が困難となる.

この問題を解決するため, 送受信局数を増やすことによる位置推定精度の向上法が検討されている [49]–[51]. 同手法は, ある送受信局の組み合わせでそれぞれ算出した MUSIC スペクトラムを乗算することで複数局の合成を行う. 1 つ目の問題の解決として, 送受信局数を増加させることで, 一組の送受信局から対象が死角となる場合であっても別の組の送受信局から観測が可能となり, 位置推定精度の劣化を防ぐことができる. しかし, 対象数が著しく多い場合には近い対象が遠い対象をブロックする確率が増えるため, 測位精度が劣化する. 2 つ目の問題の解決として, 複数送受信局の配置により一組の送受信局から対象が遠距離となる場合であっても別の組の送受信局には近づき, 測位精度の劣化を防ぐことができる. しかし, 送受信局からの遠近に関わらず同じ信頼度で合成するため, 推定範囲が広範囲になると対象から遠い送受信局による低精度の測位結果が近い送受信局による高精度な測位結果に影響を与え, 推定精度が劣化する. また, 3 つ目の問題は複数局を用いることのみでは解決されない.

ここまでは, 対象位置の推定手法について述べた. 一方, 対象の位置を連続的に推定することで対象の位置追従を行う検討が行われている [52]. 同手法では, 対象位置を数秒間隔で推定することで対象の位置を追従している. しかし, 呼吸等の生体活動を観測するために数秒から数十秒間の測定時間が必要であり, 測定時間が長時間になるほど対象の移動距離が長くなる. 対象が等速で移動しているとき, 対象位置は観測時間内の平均位置に推定されるため, 遅延として現在の位置との誤差を生じる. これに対して, 受信信号の線形予測を用いてリアルタイムにトラッキングを行う手法が提案されている [53]. 同手法では, 受信信号を AR モデル (Autoregressive model) の一つである バーグ (Burg) 法を用いてチャンネル時間応答を線形的に予測する. しかし, 予測時間が長くなるほど予測精度が劣化し, 測位誤差が大きくなる.

### 1.3 本研究の目的

本研究の目的は、複数局協調型レーダを用いた位置推定法および位置追従法の提案および評価である。

1.2節で説明した従来法の問題点とその解決方法を以下に記す。

#### 1. 多人数測位精度の改善

対象数が著しく多くなるとすべての送受信局から死角となる範囲が生じる。そこで、複数局の情報を活用することにより、多人数時の測位精度改善を図る。送受信局の配置による測位精度の検討を行い、高精度な測位が可能な配置における多人数測位精度を評価する。

#### 2. 複数局を用いた広域測位法の確立

全ての送受信局の MUSIC スペクトラムの合成する際に対象-送受信局間の距離を関数として重みづけを行うことである送受信局に近い範囲の測位結果の信頼度を向上させ、遠い範囲の信頼度を減少させる。これにより、対象から近い送受信局による高精度な推定結果が強調されると考えられる。

#### 3. 対象数の事前情報を必要としない測位アルゴリズムの確立

MUSIC 法では、対象数を設定することで人数分のピークを検出できる。対象に対応するピークは、雑音によるピークと比較し大きくなることから対象数を 1 名, 2 名, ... のように設定し合成することで、対象数を設定することなく対象数分のピークを検出できると考えられる。

#### 4. 過去の観測データと未来の予測データを組み合わせたリアルタイムトラッキング

従来法のチャンネル時間応答の線形予測から算出した現在の測位結果と過去、直前の測位結果に移動速度を考慮して合成しすることで対象位置の補正を行う。また、対象位置の時間変化より対象の歩行速度を算出することが可能である。対象の歩行速度の低下と認知症との関連性について研究されており [54][55], 対象の位置追従と移動速度の同時推定は見守りシステムに重要である。



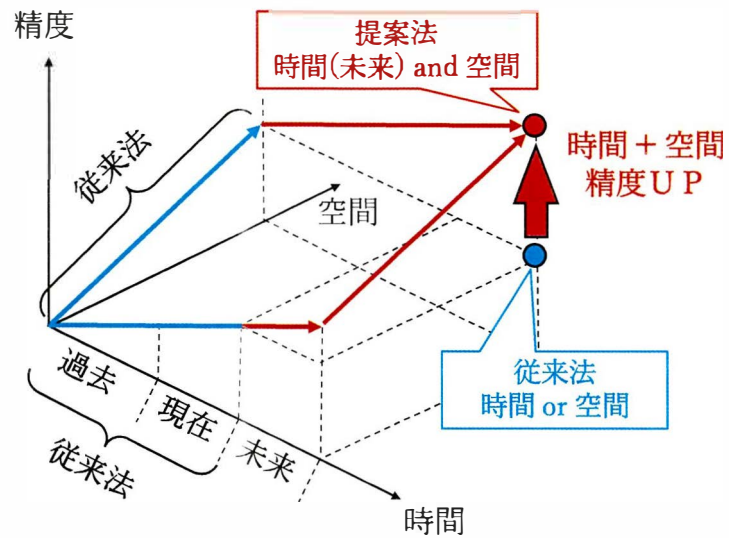


図 1.3: 本研究のインパクト

図 1.3 に本研究のインパクトを示す。本研究では、上記の問題を解決することにより、空間成分と時間成分の融合により測位精度の向上を目標とする。従来の複数送受信局を用いた測位法により空間分解能が向上することが確認されている。本研究では、さらなる空間分解能の向上を目的として、複数対象の重なりによる死角の減少効果の確認や対象-送受信局間距離を考慮した測位精度評価を行う。また、従来のトラッキングにおける遅延が生じる問題において、過去から未来までのすべての情報を用いて時間分解能を向上させることにより対象の移動速度を推定することでトラッキング精度を向上させる。さらに、複数送受信局による空間成分と過去から未来までの時間成分の融合によるリアルタイムかつ高精度なトラッキングの実現を目標とする。

## 1.4 本論文の構成

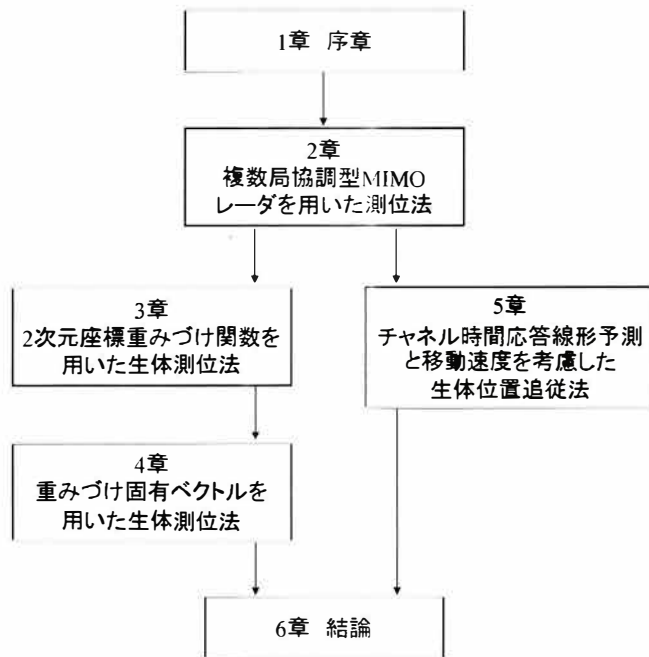


図 1.4: 本論文の構成

図 1.4 に本論文の構成を示す。本章，第 1 章では序論として本研究の背景，従来手法とその問題点，本論文の目的を述べた。第 2 章-第 5 章の各章では，1.3 節で述べた 4 つの問題に対する検討をそれぞれ行う。第 2 章では，複数局協調型 MIMO レーダを用いた測位法について述べる。まず，MIMO レーダによる位置推定法および複数送受信局の協調法について述べる。次に，シミュレーションにより送受信局の配置方法について検討を行う。最後に，シミュレーションおよび実験により対象が多人数の場合の測位精度を評価する。第 3 章では，2 次元重みづけ関数を用いた生体測位法について述べる。対象が送受信局から離れると測位精度が劣化する問題に対して，近い場所にいる場合には高信頼度，遠い場所にいる場合には低信頼度のように対象とアンテナ間の距離に応じて重みづけを行うことで測位精度の向上を図る。2 次元重みづけ関数を用いた生体測位法について説明し，実験により評価を行う。第 4 章では，重みづけ固有ベクトルを用いた生体測位法について述べる。対象の位置を推定する際には対象数が必要であるが，対象数を正確に推定することは困難である。そのため，対象数が既知ではない場合であっても測位が可能となる手法を提案する。測位に使用する MUSIC 法 [36] はノイズ方向 (対象の存在しない方向) を検出し，逆数をとることにより対象位置を強調する手法である。アンテナ数から人数を引いた数がノイズ成分となるが，対象からの成分と比較しノイズ成分は小さくなることを利用して対象が 1 名存在する場合からアンテナ数と同数存在する環境までを合算する。想定した対象数が実際の人数より少ない場合には MUSIC

法によるピークは鋭利なものとなり，多くなるにつれてピークは緩やかになるため，合算することで鋭利なピークが残存し，対象の位置と推定可能である．ここでは，重みづけ固有ベクトルを用いた生体測位法について説明し，実験により評価を行う．第 5 章では，チャンネル時間応答線形予測と移動速度を考慮した生体位置追従法について述べる．現在の測定チャンネルから未来のチャンネルを予測し，過去，現在，未来のチャンネルから算出した MUSIC スペクトラムを合成することで位置推定と速度推定を行う．ここでは，チャンネル時間応答線形予測と移動速度考慮した生体位置追従法の原理を説明し，シミュレーションおよび実験により評価を行う．最後に，第 6 章において本論文のまとめを述べる．

## 第2章 複数局協調型MIMOレーダを用いた測位法

電波を用いた生体センシングの重要な要素として複数対象の測位が挙げられる。高齢者施設では同時に多人数の測位が必要となるが、対象数が多くなると送受信局から近い対象が遠い対象を遮り、後方の対象の測位精度が劣化する。これに対し、複数送受信局を用いることで多人数の測位精度が向上すると考えられる。しかし、複数の送受信局を使用するとき、送受信局の組み合わせにより対象での反射点が異なる。そのため、従来法 [32]–[34] を適用するとそれぞれの送受信局が互いに干渉し、干渉縞を生じることでピークを検出できない。そこで、それぞれの送受信局の組み合わせごとに MUSIC スペクトラムを算出し、スペクトラムを乗算することで合成する手法について説明する。次に、送受信局の配置の違いによる測位精度をシミュレーションにより評価する。最後に 1~8 名の対象が存在する環境を想定したシミュレーションおよび実験により測位精度を評価する。

### 2.1 複数局協調型 MIMO レーダを用いた測位法の原理

図 2.1 に本手法のスペクトラム合成の概念図を示す。同図左上のようにある送受信局から Target A を観測可能であり Target B はノイズによるピークと区別がつかない場合のスペクトラム、また、同図右上のように別の送受信局では Target B を観測可能であり、Target A はノイズによるピークと区別がつかない場合のスペクトラムを乗算すると同図下のようになり、ある送受信局から観測可能となると対象の位置を推定可能である。以下では、このスペクトラム合成方法を数式を用いて説明する。

図 2.2 のような複数送受信局を用いて測定環境内に  $L$  人の対象が存在する環境を想定する。 $M_T$  素子の送信局を  $S_T$  局、 $M_R$  素子の受信局を  $S_R$  局からなる  $(M_R \times S_R) \times (M_T \times S_T)$  MIMO アンテナ構成を想定し、時変動チャンネルを観測する。このとき、観測される時変動 MIMO チャンネル  $\mathbf{H}$  は

$$\mathbf{H}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{H}^{(11)}(t) & \dots & \mathbf{H}^{(1S_T)}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}^{(S_R1)}(t) & \dots & \mathbf{H}^{(S_RS_T)}(t) \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

と表される。ここで、 $t$  はチャンネル観測時間を表す。このうち、 $s_T$  番目の送信局から送信され  $s_R$  番目の

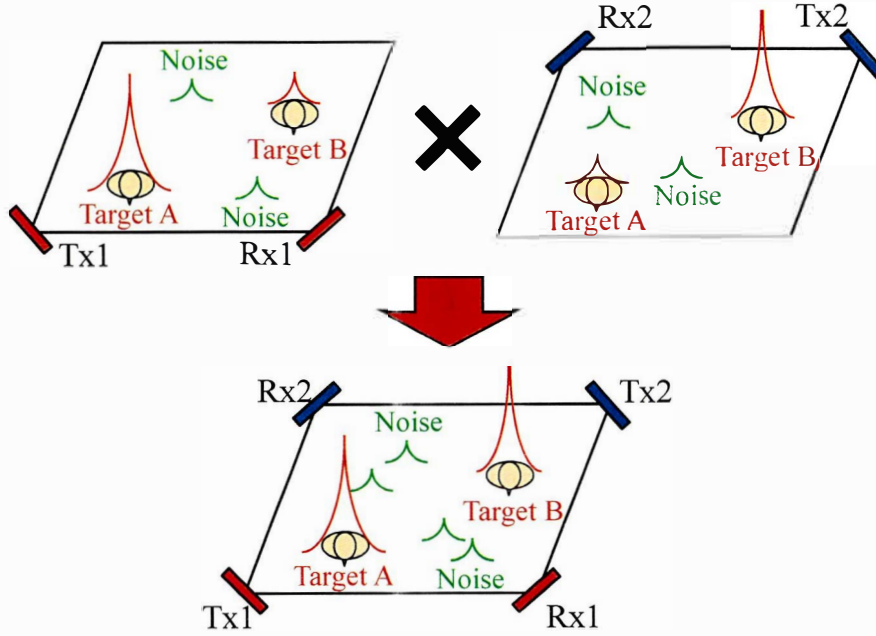


図 2.1: スペクトラム合成の概念図

受信局で受信するチャンネルは

$$\mathbf{H}^{(s_R s_T)}(t) = \sum_{l=1}^L A_l(t) \mathbf{a}^{(s_R s_T)}(x_l, y_l) \quad (2.2)$$

$$= \begin{pmatrix} \sum_{l=1}^L A_l(t) a_{11}^{(s_R s_T)}(x_l, y_l) & \dots & \sum_{l=1}^L A_l(t) a_{1M_T}^{(s_R s_T)}(x_l, y_l) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{l=1}^L A_l(t) a_{M_R 1}^{(s_R s_T)}(x_l, y_l) & \dots & \sum_{l=1}^L A_l(t) a_{M_R M_T}^{(s_R s_T)}(x_l, y_l) \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

$$= \begin{pmatrix} h_{11}^{(s_R s_T)}(t) & \dots & h_{1M_T}^{(s_R s_T)}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_R 1}^{(s_R s_T)}(t) & \dots & h_{M_R M_T}^{(s_R s_T)}(t) \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

と表される。ここで、 $A_l(t)$  は  $l$  番目の対象の生体活動による時変動成分、 $\mathbf{a}^{(s_R s_T)}(x_l, y_l)$  は  $l$  番目の対象の座標  $(x_l, y_l)$  における  $s_T$  番目の送信局から  $s_R$  番目の受信局への球面波モードベクトルを表す。第  $(i, j)$  要素である  $h_{ij}^{(s_R s_T)}$  は  $s_T$  番目の送信局の  $j$  番目の送信アンテナから  $s_R$  番目の受信局の  $i$  番目の受信アンテナへのチャンネル応答を表す。また、2次元座標  $(x, y)$  における  $s_T$  番目の送信局から  $s_R$  番目の受信局への球面波モードベクトルは

$$\mathbf{a}^{(s_R s_T)}(x, y) = \mathbf{a}^{(s_T)}(x, y) \otimes \mathbf{a}^{(s_R)}(x, y) \quad (2.5)$$

$$\mathbf{a}^{(s_T)}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{M_T}} \left[ e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} d_1^{(s_T)}}, e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} d_2^{(s_T)}}, \dots, e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} d_{M_T}^{(s_T)}} \right]^T \quad (2.6)$$

$$\mathbf{a}^{(s_R)}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{M_R}} \left[ e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} d_1^{(s_R)}}, e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} d_2^{(s_R)}}, \dots, e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} d_{M_R}^{(s_R)}} \right]^T \quad (2.7)$$

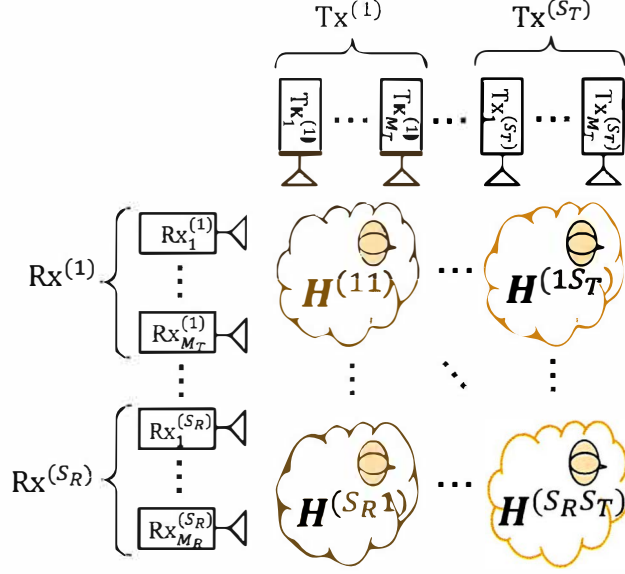


図 2.2: 本手法の概念図

$$d_j^{(s_T)} = \sqrt{(x - x_j^{(s_T)})^2 + (y - y_j^{(s_T)})^2} \quad (2.8)$$

$$d_i^{(s_R)} = \sqrt{(x - x_i^{(s_R)})^2 + (y - y_i^{(s_R)})^2} \quad (2.9)$$

ここで、 $\otimes$  はクロネッカ積、 $\{\cdot\}^T$  は転置、 $\lambda$  は波長、 $(x_j^{(s_T)}, y_j^{(s_T)})$  は  $s_T$  番目の送信局の  $j$  番目のアンテナの座標と座標  $(x, y)$  との距離、 $d_i^{(s_R)}$  は  $s_R$  番目の受信局の  $i$  番目のアンテナの座標  $(x_i^{(s_R)}, y_i^{(s_R)})$  と座標  $(x, y)$  との距離を表す。このチャンネルには家具や壁等からに反射しながら伝搬する反射波や送受信機間の直接波が含まれる。これらの不要波を取り除き、呼吸や心拍等の生体活動に由来する成分のみを抽出するためにフーリエ変換を行う。式 (2.4) はフーリエ変換により

$$\mathbf{F}^{(s_R s_T)}(\omega) = \begin{pmatrix} f_{11}^{(s_R s_T)}(\omega) & \dots & f_{1M_T}^{(s_R s_T)}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{M_R 1}^{(s_R s_T)}(\omega) & \dots & f_{M_R M_T}^{(s_R s_T)}(\omega) \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

と表すことができる。ここで  $\omega$  は生体活動に対応する周波数である。文献 [56] を用いて送信機および受信機と対象との角度を同時に求めることで位置を推定するため、この周波数応答行列  $\mathbf{F}^{(s_R s_T)}(\omega)$  のベクトル化を行うと

$$\mathbf{f}^{(s_R s_T)}(\omega) = [f_{11}^{(s_R s_T)}(\omega), f_{21}^{(s_R s_T)}(\omega), \dots, f_{M_R M_T}^{(s_R s_T)}(\omega)]^T, \quad (2.11)$$

と表すことができる。この周波数応答ベクトルから相関行列を求めると

$$\mathbf{R}^{(s_R s_T)} = E[\mathbf{f}^{(s_R s_T)}(\omega) \mathbf{f}^{(s_R s_T)H}(\omega)], \quad (2.12)$$

と表すことができる。ここで、 $\{\cdot\}^H$  は複素共役転置、 $E[\cdot]$  はアンサンブル平均を表す。この相関行列を固有値分解すると

$$\mathbf{R}^{(s_{RST})} = \mathbf{U}^{(s_{RST})} \mathbf{\Lambda}^{(s_{RST})} \mathbf{U}^{(s_{RST})H}, \quad (2.13)$$

$$\mathbf{U}^{(s_{RST})} = [\mathbf{u}_1^{(s_{RST})}, \mathbf{u}_2^{(s_{RST})}, \dots, \mathbf{u}_{M_R M_T}^{(s_{RST})}], \quad (2.14)$$

$$\mathbf{\Lambda}^{(s_{RST})} = \text{diag}([\lambda_1^{(s_{RST})}, \lambda_2^{(s_{RST})}, \dots, \lambda_{M_R M_T}^{(s_{RST})}]), \quad (2.15)$$

と表される。ここで、 $\mathbf{U}^{(s_{RST})}$  は固有ベクトル、 $\mathbf{\Lambda}^{(s_{RST})}$  は固有値の対角行列を表す。また、固有ベクトルの雑音成分  $\mathbf{U}_N^{(s_{RST})}$  は

$$\mathbf{U}_N^{(s_{RST})} = [\mathbf{u}_{L+1}^{(s_{RST})}, \dots, \mathbf{u}_{M_R M_T}^{(s_{RST})}] \quad (2.16)$$

と表す。これより MUSIC スペクトラムは

$$P_{\text{MUSIC}}^{(s_{RST})}(x, y) = \frac{\mathbf{a}^{(s_{RST})H}(x, y) \mathbf{a}^{(s_{RST})}(x, y)}{\mathbf{a}^{(s_{RST})H}(x, y) \mathbf{U}_N^{(s_{RST})} \mathbf{U}_N^{(s_{RST})H} \mathbf{a}^{(s_{RST})}(x, y)} \quad (2.17)$$

のように算出される。このようにすべての送受信局の組み合わせにおいて MUSIC スペクトラムを算出し、

$$P_{\text{MUSIC}}(x, y) = \prod_{s_R=1}^{S_R} \prod_{s_T=1}^{S_T} P_{\text{MUSIC}}^{(s_{RST})}(x, y) \quad (2.18)$$

のように乗算することですべての MUSIC スペクトラムを合成する。この合成したスペクトラムのピークを生体位置と判定する。また、本論文では、波数推定法 [37]–[40] や人数推定法 [41]–[48] により理想的な対象数  $L$  が得られるものとして検討を行った。

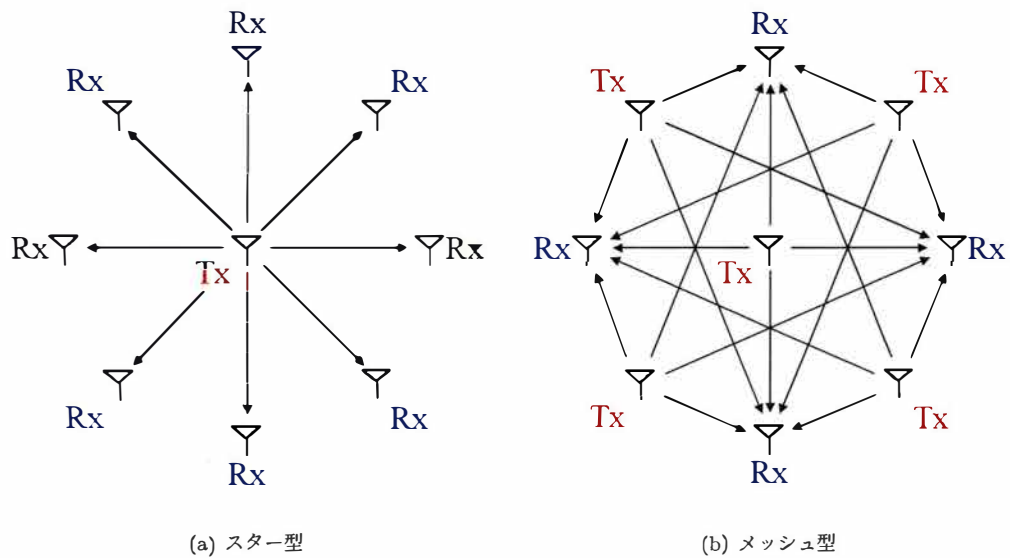


図 2.3: リンク例

## 2.2 ネットワークトポロジを考慮した複数協調型 MIMO レーダ

図 2.3 に送受信局配置の違いによるリンク例を示す。同図 (a) はスター型、同図 (b) はメッシュ型である。スター型は 1 局の送信局に対して複数の受信局を配置し、放射状にリンクを形成する形態である。メッシュ型は送受信局双方に複数局を用いて網目状に通信を行う形態である。送受信局数の合計が 9 局の場合、送受信局をスター型に配置した場合のリンク数は 8 であるが、送信局 5 局、受信局 4 局のメッシュ型に配置することでリンク数が 20 に増加する。複数対象が存在する場合、対象どうしが近接する場合や送受信局からみて前方の対象が後方対象を遮る問題があるが送受信局をメッシュ型に配置することでスター型と比較し対象を様々な角度から観測することが可能となり、測位精度が向上すると考えられる。



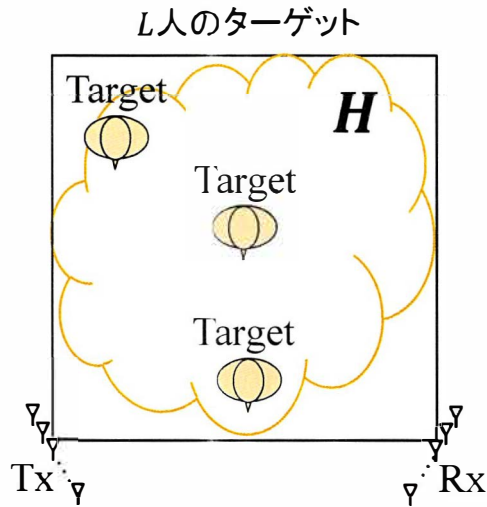


図 2.1: 想定モデル

## 2.3 ネットワークトポロジによる測位性能の評価

本節では、ネットワークトポロジによる測位性能改善の評価を行う。スター型配置とメッシュ型配置におけるリンク数の違いによる対象の測位精度を評価する。以下では、対象のモデリング方法としてレイトレース解析による生体経由の伝搬路のモデル化について説明し、シミュレーションにより測位精度の評価を行う。

### 2.3.1 レイトレース解析による生体経由の伝搬路のモデル化

図 2.4 のように対象が複数人存在する環境を模擬する。実際の生体は呼吸や心拍に起因する体表面の変動や体動等によるランダムに変動するため、正確に模擬することは難しい。そのため、対象を十分な時間観測したときに算出される相関行列を疑似的に算出する。本項では、イメージング法に基づくレイトレース解析により、対象で反射して伝搬する伝搬経路のモデリング方法について 4 ステップにより述べる。

Step1: 対象の位置に受信点があると仮定して送信-対象間のチャンネルを算出

図 2.5(a) のように  $l$  番目対象の位置に受信機があるものと仮定して送受信機間の伝搬経路を算出し、送信機から対象への伝搬経路  $h_l^{(sT)}$  とする。

Step2: 対象の位置に受信点、受信機の位置に送信機があると仮定して対象-受信機間のチャンネルを算出

図 2.5(b) のように Step1 と同様に  $l$  番目対象の位置に受信機があるものと仮定する。また、受信機の位置に送信機があるものとして送受信機間の伝搬経路を算出し、対象から受信機への伝搬経路  $h_l^{(sR)}$  とする。

Step3: 送信-対象, 対象-受信の伝搬チャンネルを合成

図 2.5(c) に示すように Step1 で求めた送信-対象間のチャンネル  $\mathbf{h}_i^{(s_T)}$  と対象-受信間のチャンネル  $\mathbf{h}_i^{(s_R)}$  を

$$\mathbf{H}_i^{(s_R s_T)} = \mathbf{h}_i^{(s_R)} \mathbf{h}_i^{(s_T)T} \quad (2.19)$$

のように乗算する. また, このチャンネルをベクトル化したものを  $\mathbf{h}_i^{(s_R s_T)}$  とする.

Step4: 全  $L$  人分のチャンネルを乗算

図 2.5(d) のように Step3 までの計算を全  $L$  人分に行い, 相関行列  $\mathbf{R}^{(s_R s_T)}$  を

$$\mathbf{R}^{(s_R s_T)} = \sum_{l=1}^L \mathbf{h}_l^{(s_R s_T)} \mathbf{h}_l^{(s_R s_T)H} \quad (2.20)$$

のように算出する. 以下, この相関行列を用いて 2.1 節と同様に対象の位置を推定する.

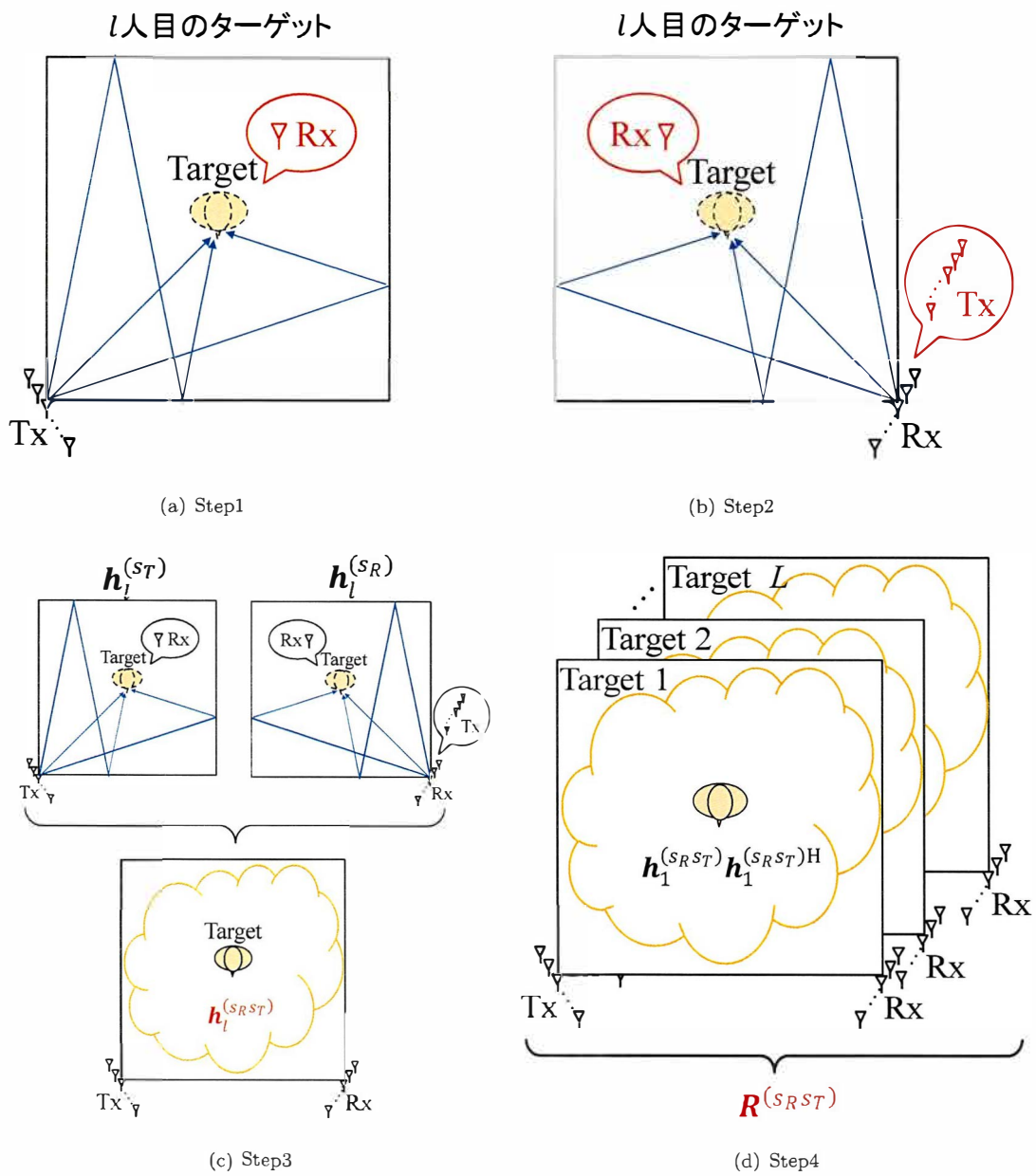


図 2.5: レイトレース解析による生体経路の伝搬路のモデル化

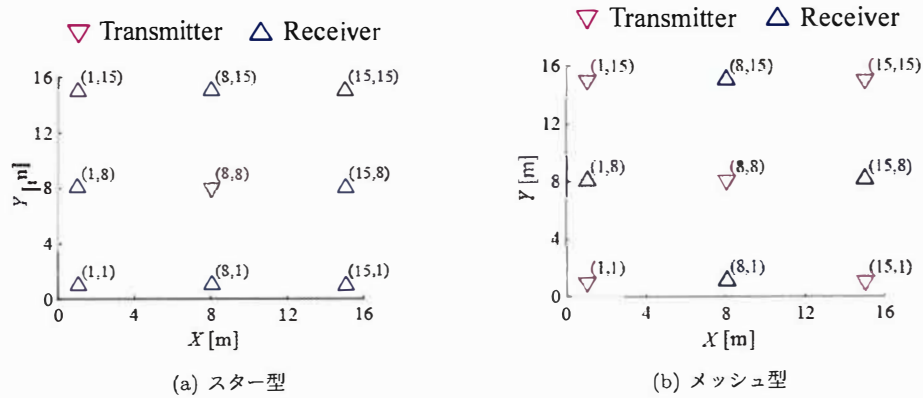


図 2.6: ネットワークトポロジ

表 2.1: シミュレーション条件

ネットワークトポロジ	スター型	メッシュ型
使用アンテナ	モノポールアンテナ	モノポールアンテナ
素子配置	円形アレー	円形アレー
送信局数 ( $S_T$ )	1 局	5 局
受信局数 ( $S_R$ )	8 局	4 局
送信素子数 ( $M_T$ )	8 素子	8 素子
受信素子数 ( $M_R$ )	8 素子	8 素子
アンテナ高	1.0 m	1.0 m
使用周波数	2.47125 GHz	2.47125 GHz
反射回数	5 回	5 回
対象数	1, 3, 5 名	1, 3, 5 名
試行回数	50 回	50 回

### 2.3.2 シミュレーション条件

図 2.6 に本シミュレーションにおけるネットワークトポロジ、実験環境、表 2.1 に本シミュレーションの条件を示す。本シミュレーションは、16 m×16 m×2.5 m の屋内環境を想定した。同図 (a) は送信 1 局、受信 8 局を用いたスター型、同図 (b) は送信 5 局、受信 4 局用いたメッシュ型のアンテナ配置である。8 素子のモノポールアンテナを円形アレー配置したアンテナ局を送受信局に用いた。アンテナ高を 1 m、使用周波数を 2.47125 GHz、壁や床からの反射を 5 回とした。本シミュレーションでは、対象数を 1, 3, 5 名とし、ランダムな位置に対象を配置し、各人数につき 50 回測定を行った。

### 2.3.3 シミュレーション結果

図 2.7 に対象が 1 名時の MUSIC スペクトラムの例を示す。同図 (a) はスター型、同図 (b) はメッシュ型である。また、○は対象の実位置、+は推定位置、▽は受信局の位置、△は送信局の位置を示す。対象が 1 名の場合には、スター型、メッシュ型の双方とも高精度に対象を推定可能であることが確認できた。

図 2.8 に対象が 3 名時の MUSIC スペクトラムの例を示す。同図 (a) はスター型、同図 (b) はメッシュ型である。同図中の記号は上記と同様である。同図 (a) では、2 名の対象が送受信局の直線上に配置されているため、1 名の位置が推定不可となった。同図 (b) では、送受信局双方ともに複数局を用いることで対象を様々な角度から観測可能となり、複数名の対象がある送受信局と直線上に配置される場合であっても、他の組み合わせの送受信局により観測が可能となり 3 名すべての位置を高精度に推定可能であることが確認できる。

図 2.9 に対象が 5 名時の MUSIC スペクトラムの例を示す。同図 (a) はスター型、同図 (b) はメッシュ型である。同図中の記号は上記と同様である。同図 (a) では、対象が送信局から離れているために 2 名の位置を推定不可となった。同図 (b) では、複数送受信局により、ある対象に近い送受信局の組み合わせがあるために 5 名すべての位置を推定可能となった。

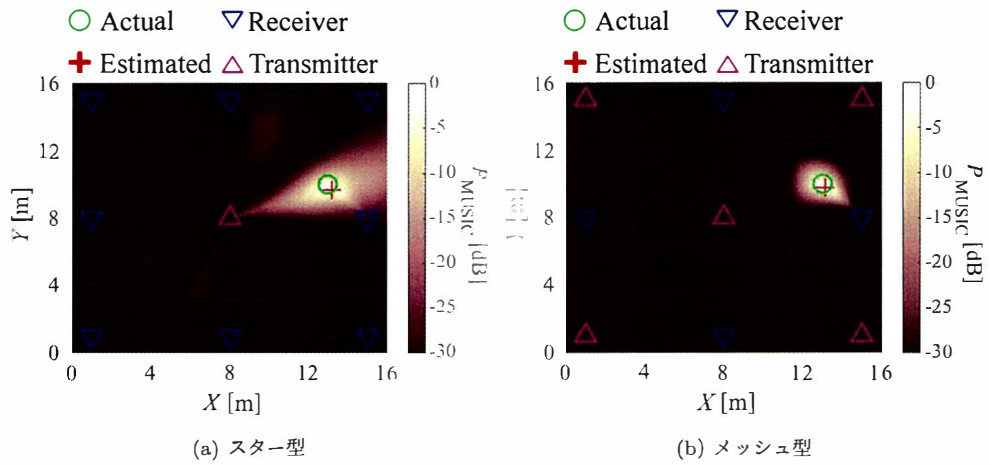


図 2.7: MUSIC スペクトラム例 (対象 1 名時)

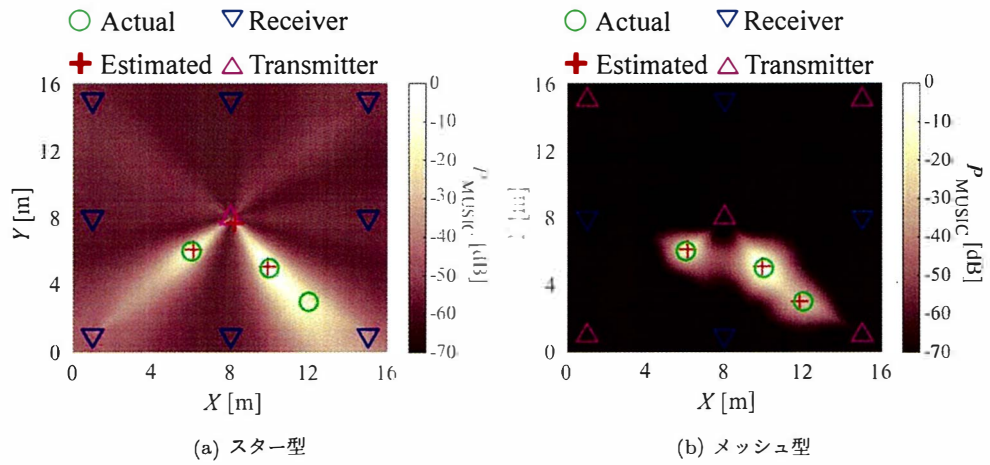


図 2.8: MUSIC スペクトラム例 (対象 3 名時)

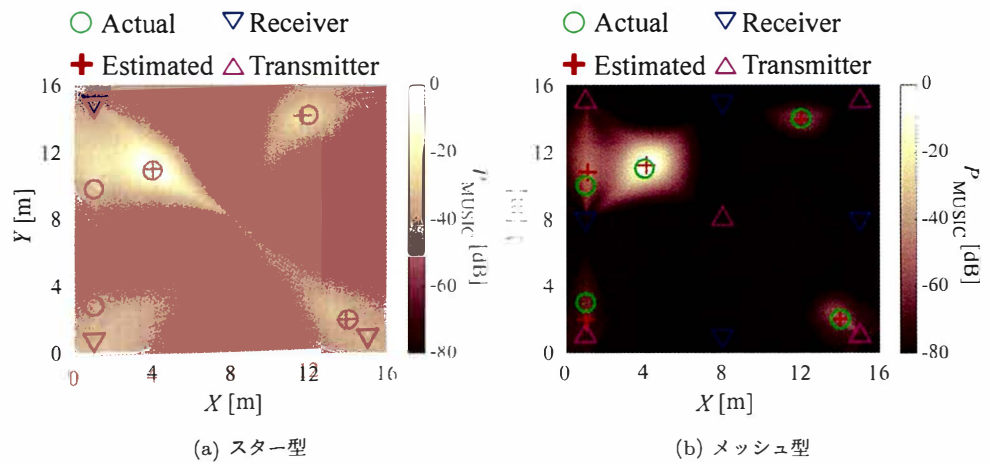


図 2.9: MUSIC スペクトラム例 (対象 5 名時)

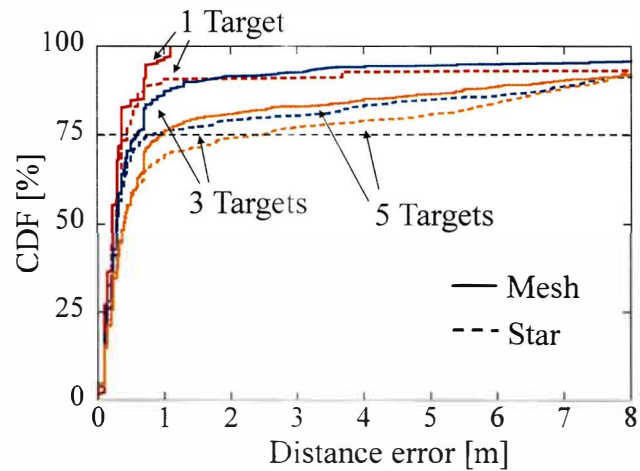


図 2.10: 位置推定誤差の CDF

図 2.10 に送受信局配置と対象数による測位誤差の CDF を示す。同図の実線はメッシュ型、破線はスター型である。同図の位置推定誤差の 75% 値を比較すると対象が 1 名の場合は 0.45m(スター型), 0.36 m(メッシュ型) となった。また, 対象が 3 名の場合は 0.81m(スター型), 0.58m(メッシュ型), 対象が 5 名の場合は 2.3m(スター型), 0.95m(メッシュ型) となり, すべての場合においてメッシュ型が高精度に位置を推定することが可能であることを確認した。また, 本シミュレーションでは対象を点と想定しているために, アンテナから後方の対象が前方の対象をブロックする効果は発生しない。生体による実験を行う際には, 体形によるブロッキング効果が生じるため, 対象の測位精度は劣化すると考えられる。送信が 1 局のスター型は送信局から見て後方の対象がブロッキングされると測位ができなくなるため, 実験を行う際にはスター型がより影響を受けて測位精度が劣化するが, メッシュ型では複数の送受信局により様々な角度から観測可能となり, 後方対象のブロッキングの影響は低いと考えられる。

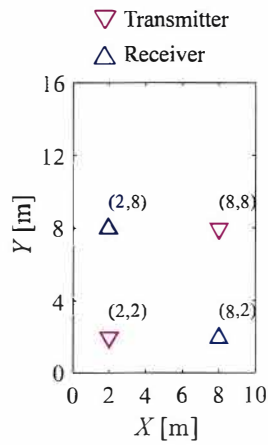


図 2.11: アンテナ配置

図 2.12: シミュレーション条件

使用アンテナ	モノポールアンテナ
素子配置	円形アレー
送信局数 ( $K_T$ )	2 局
受信局数 ( $K_R$ )	2 局
送信素子数 ( $M_T$ )	8 素子
受信素子数 ( $M_R$ )	8 素子
アンテナ高	1.0 m
使用周波数	2.47125 GHz
反射回数	5 回
対象数	1~8 名
試行回数	77 回 (1 名) 200 回 (2~8 名)

## 2.4 多人数測位精度の評価

前節では、メッシュ型配置がより高精度に測位が可能であることを確認した。複数対象が存在する場合、対象同士が近接する場合や送受信局からみて前方の対象が後方の対象を遮る場合が生じ、測位精度が劣化する。対象数が多くなるほどこの問題が顕著になるが、複数の送受信局を用いることで対象を複数方向から観測できるようになり、測位精度の向上が期待できる。本節では、実環境を模擬したシミュレーションおよび実験により 1~8 名の対象が存在する場合であっても、複数送受信局を用いることにより高精度な測位が可能であることを明らかとする。

### 2.4.1 シミュレーション条件

図 2.11 にシミュレーション時のアンテナ配置、表 2.12 にシミュレーション条件を示す。本シミュレーションでは、コンクリート壁に囲まれた縦 16 m × 横 10 m × 高さ 2.5 m の屋内環境を想定した。8 素子のモノポールアンテナを円形に配置したアレーアンテナを 1 局とし、送信機、受信機それぞれ 2 局ずつ用いた。使用周波数は 2.47125 GHz、壁からの反射回数を 5 回とした。1~8 名の対象が  $1 \text{ m} \leq X \leq 9 \text{ m}$ ,  $1 \text{ m} \leq Y \leq 9 \text{ m}$  の範囲のランダムな位置に配置し、各人数につき 200 回試行した。また、2.3.1 節で説明したモデリング方法を用いて生体を模擬した。



## 2.4.2 シミュレーション結果

図 2.13-2.15 に 1 名, 3 名, 8 名時の MUSIC スペクトラムの例を示す. これらの図内の (a) は送受信局をそれぞれ 1 局ずつ計 2 局使用した場合, (b) は 2 局ずつ計 4 局使用した場合の結果である. また, ○は対象の実位置, +は推定位置, ▽は受信局の位置, △は送信局の位置を示す. 図 2.13(a) では, 対象が送受信局から離れることにより実位置と推定位置に誤差を生じる結果となった. 同図 (b) は, 複数送受信局を用いることで対象が送受信局に近づくことで高精度に対象の位置が推定されていることが分かる. 図 2.14(a) では, 送受信局から見て最後方の対象は前方の 2 名により送信局または受信局から遮られているため, 位置を推定することが困難となっているが同図 (b) では, 複数送受信局により様々な方向から観測することが可能となり 3 名の位置を高精度に推定可能であることを確認した. 図 2.15(a) では, 対象が多くなるほど対象同士が近接するため, 位置を分離して推定することができず 1 名として推定されることで大きな誤差を生じている. 同図 (b) では, 複数の送受信局を用いることで, 対象はある送受信局に近づくこととなり高精度に推定可能となっている. さらに, 送受信局の MUSIC スペクトラムの合成により位置を推定するため, ある送受信局の組み合わせでは観測不可であっても, 別の組み合わせにより観測可能であると位置の推定が可能となる. そのため, 複数送受信局の使用により, ある対象を観測可能な送受信局が存在する可能性が高まり, 複数対象を分離して位置を推定することが可能となる.

図 2.16 に位置推定誤差の CDF(Cumulative Distribution Function)を示す. 同図 (a) は対象 1 名および 2 名の場合, (b) は対象 3 名および 4 名の場合, (c) は対象 5 名および 6 名の場合, (d) は対象 7 名および 8 名の場合の位置推定誤差の CDF を表す. 図中の青線は 4 局使用時, 赤線は 2 局使用時の結果を示す. また, 同図中の実線は対象が奇数名の場合, 破線は対象が偶数名の場合の結果である. 1~8 名の 75% 値は 2 局使用時では 1.0m~7.0m, 4 局使用時では 0.36m~2.1m となった. また, 同図において送受信局を 4 局使用することで 2 局使用時と比較して高精度に位置の推定が可能となることを確認した. 対象が複数存在する場合は対象が 1 名の場合と比較し, 複数送受信局による測位誤差の改善効果が大きくなった. 対象が 1 名の場合, 送受信局から対象が離れるほど測位精度が劣化するために測位誤差を生じる. 対象が複数名の場合, 上記の問題に加え, 対象が近接することにより対象位置の分離が困難となる問題や送受信局から見て後方の対象が前方の対象を遮る問題も同時に生じる. シミュレーション結果より, 複数送受信局を用いることで対象が送受信局から離れることを防ぎ, 複数対象の分離も可能となることを確認した. そのため, 測位精度の劣化原因を同時に解決することが可能となるため, 対象が複数名の場合に複数局協調法はより効果的であることを確認した.

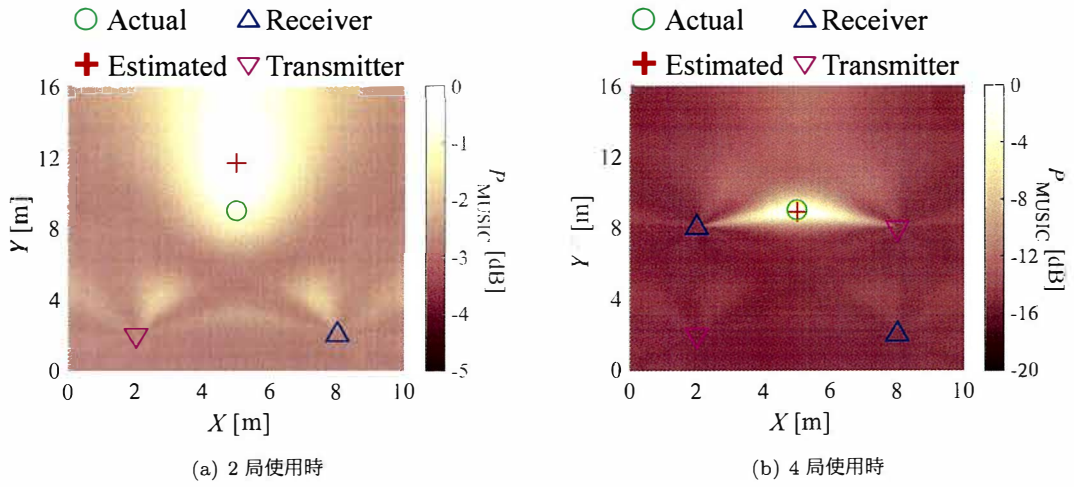


図 2.13: MUSIC スペクトラム例 (対象 1 名の場合)

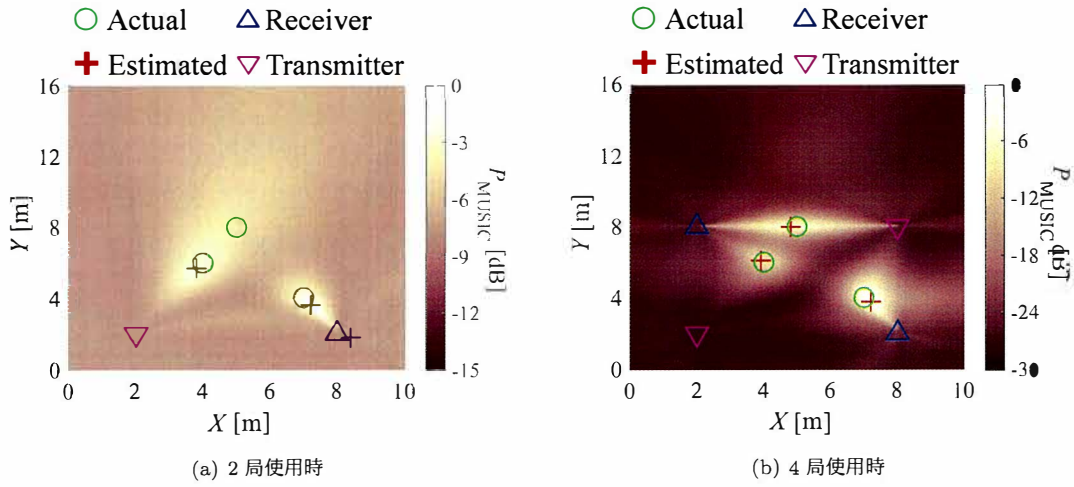


図 2.14: MUSIC スペクトラム例 (対象 3 名の場合)

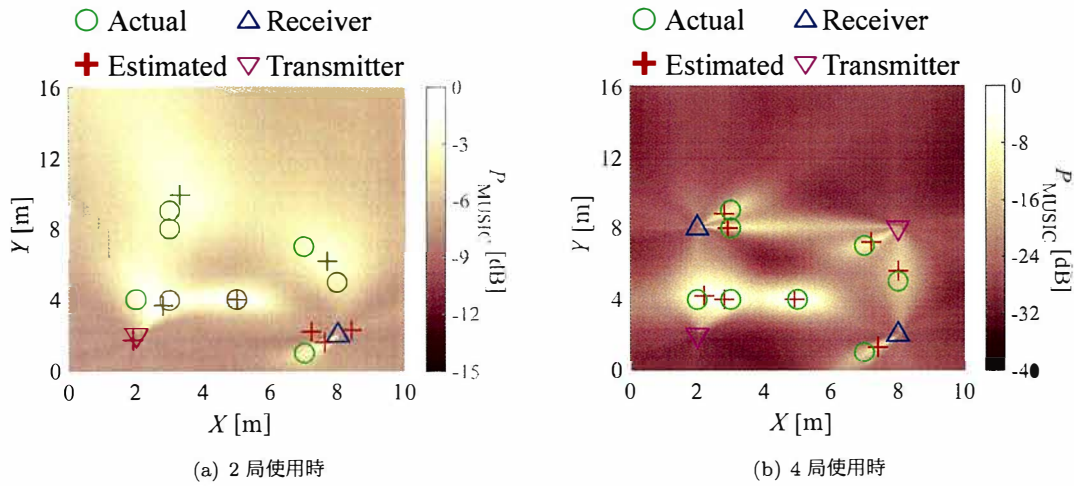
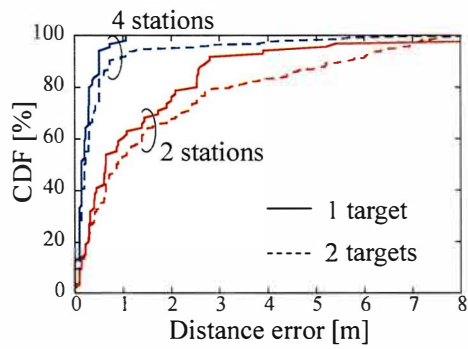
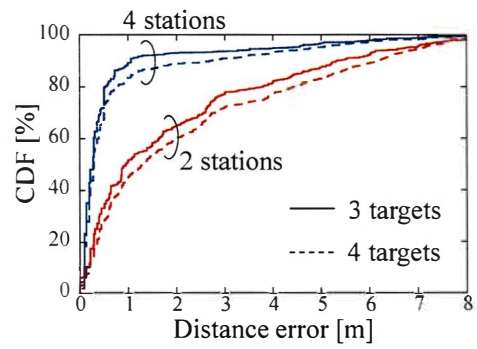


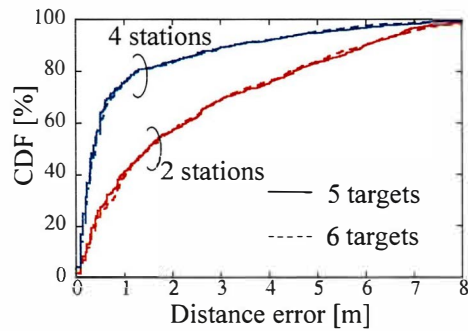
図 2.15: MUSIC スペクトラム例 (対象 8 名の場合)



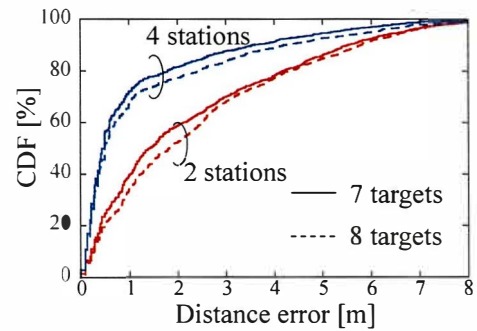
(a) 対象 1 名, 2 名の場合



(b) 対象 3 名, 4 名の場合



(c) 対象 5 名, 6 名の場合



(d) 対象 7 名, 8 名の場合

図 2.16: 位置推定誤差の CDF (シミュレーション)

### 2.4.3 実験条件

図 2.17 に実験環境, 図 2.18 に実験時の様子, 表 2 に実験条件を示す. 本実験は, 縦 16 m × 横 10 m の屋内環境において行った. 8 素子のモノポールアンテナを円形アレー配置したアンテナ局を送受信双方に 2 局用いた. 使用周波数は 2.47125 GHz, チャンネル取得周波数は 100 Hz, チャンネル測定時間は 10.24 s, 抽出生体周波数は 0.1~10 Hz とした.  $-1 \text{ m} \leq X \leq 7 \text{ m}$ ,  $-1 \text{ m} \leq Y \leq 7 \text{ m}$  の範囲に対象数が 1~8 名が存在する環境において, 対象が 1 名のとき 77 回, 2~8 名のとき各 20 回試行した.

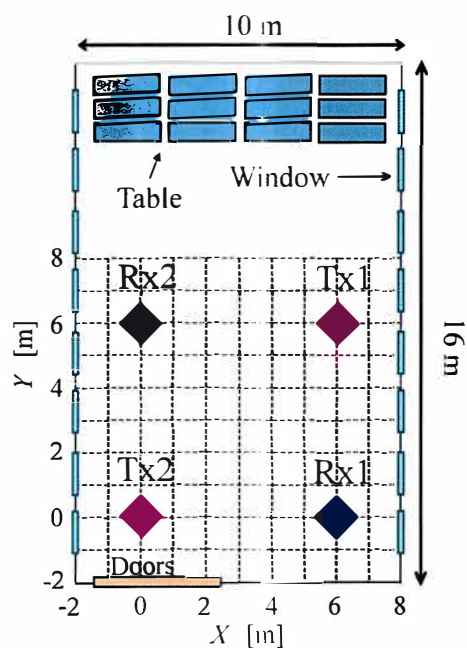


図 2.17: 実験環境

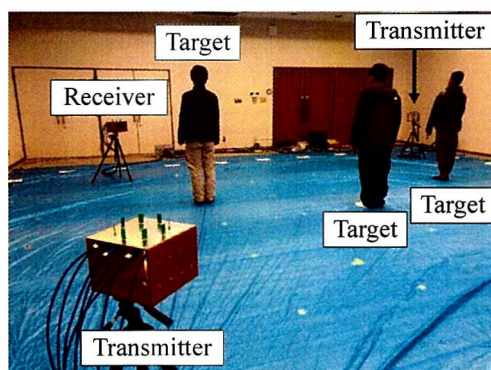


図 2.18: 実験時の様子

表 2.2: 実験条件

使用アンテナ	モノポールアンテナ
素子配置	円形アレー
送信局数 ( $K_T$ )	2 局
受信局数 ( $K_R$ )	2 局
送信素子数 ( $M_T$ )	8 素子
受信素子数 ( $M_R$ )	8 素子
アンテナ高	1.0 m
使用周波数	2.47125 GHz
チャンネル取得周波数	100 Hz
チャンネル測定時間	10.24 s
対象数	1~8 名
抽出生体周波数	0.1~10 Hz
試行回数	77 回 (1 名) 20 回 (2~8 名)

#### 2.4.4 実験結果

図 2.19-2.21 に対象が 1, 3, 8 名の場合における位置推定例を示す。これらの図の (a) は (0, 0) の位置の送信局と (6, 0) の位置の受信局を用いた場合の結果, (b) は全ての送受信局を用いた場合の結果を示す。また, ○は実際の生体位置, +は推定位置, △は受信局位置, ▽は送信局位置を表す。図 2.19(a) では, 対象が送受信局から離れているために大きな誤差を生じるが, 同図 (b) では対象近くに送受信局があるために正しい位置に推定されていることが確認できる。図 2.20(a) では, 1 名は正しい位置に推定されているが, 対象が送受信局から離れていたり 2 名の位置を分離できないために大きな誤差を生じる結果となった。また, 同図 (b) では対象が送受信局に近づき, 対象を複数方向から観測することにより複数対象の分離が可能となるため, 3 名の位置を正しく推定されていると考えられる。図 2.21(a) では, 送受信局から遠方の 3 名の位置は正しく推定することができていないが, 同図 (b) で誤差を生じる対象がいるものの 8 名全員の位置が推定可能である。

図 2.22 に位置推定誤差の CDF を示す。同図 (a) は対象 1 名および 2 名の場合, (b) は対象 3 名および 4 名の場合, (c) は対象 5 名および 6 名の場合, (d) は対象 7 名および 8 名の場合の位置推定誤差の CDF を表す。図中の青線は 4 局使用時, 赤線は 2 局使用時の結果を示す。1~8 名の 75% 値は 2 局使用時では 3.7 m~5.1 m, 4 局使用時では 0.69 m~3.3 m となった。シミュレーション時の CDF と比較し, 実験時の CDF は誤差が大きいものの形状は似通った結果となった。誤差が大きくなった理由として, 生体が近接している場合に複数対象を分離できなかったからと考えられる。これは, 送受信局数や配置を最適化することにより推定精度をさらに向上させることが可能であると考えられる。また, 生体サイズによる影響も位置推定誤差を大きくした原因と考えられる。シミュレーションにおいては対象を点としているのに対し, 実際には生体は楕円形をしている。そのため, 実際の立ち位置と各送受信局から見た反射点の違いにより誤差が生じたものと考えられる。

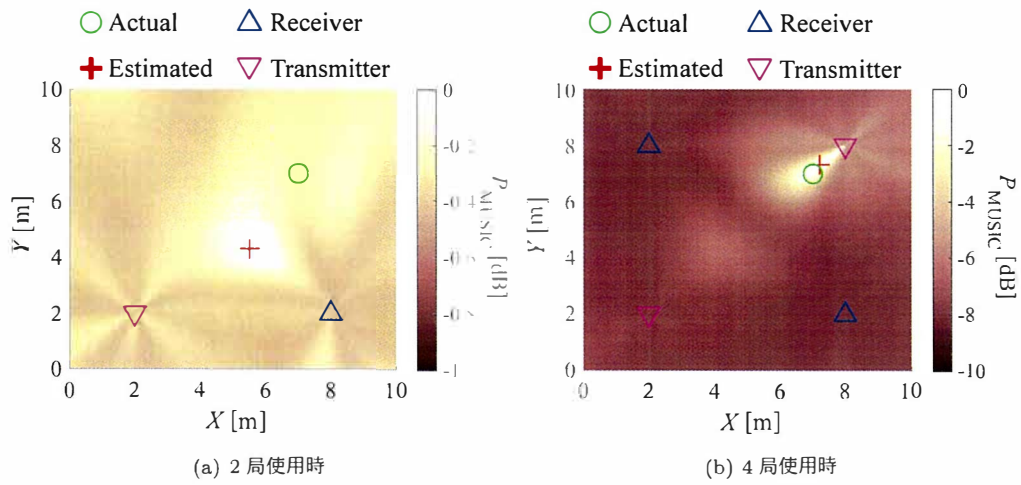


図 2.19: MUSIC スペクトラム例 (対象 1 名の場合)

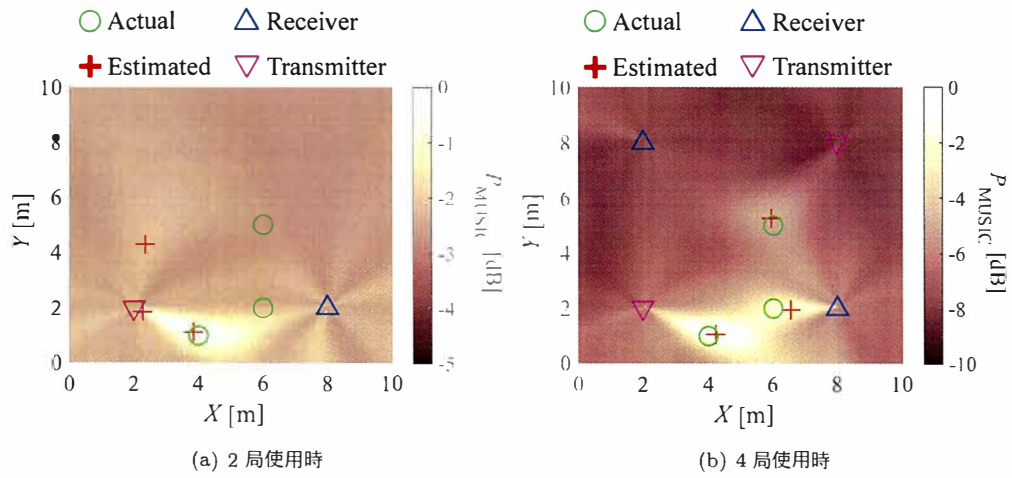


図 2.20: MUSIC スペクトラム例 (対象 3 名の場合)

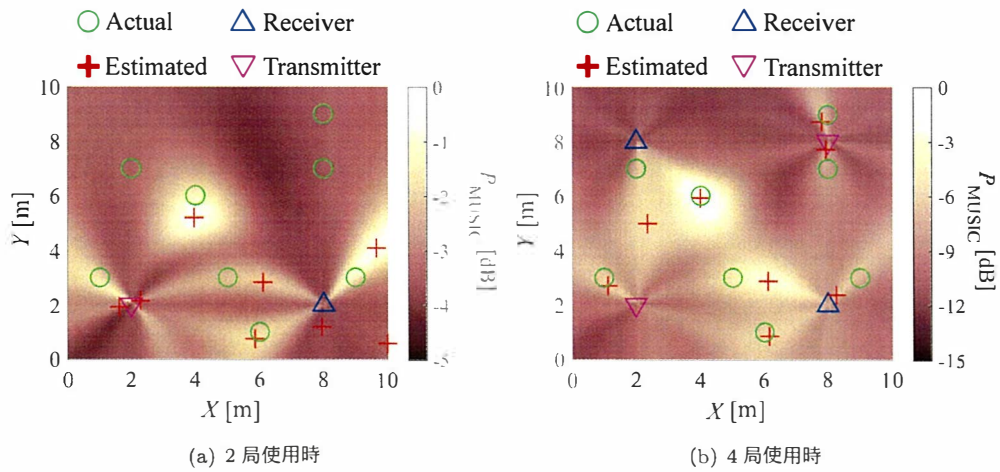
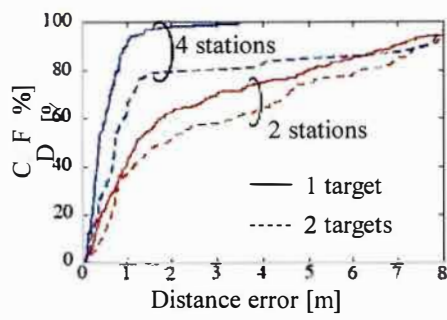
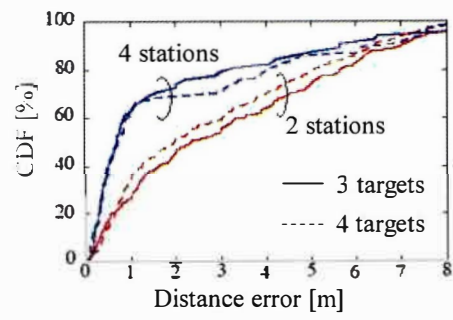


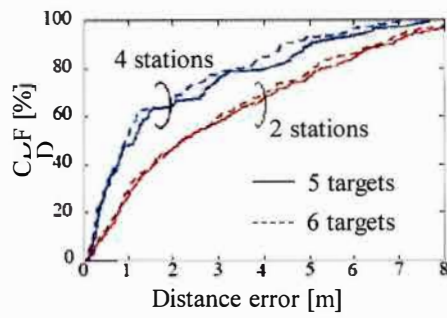
図 2.21: MUSIC スペクトラム例 (対象 8 名の場合)



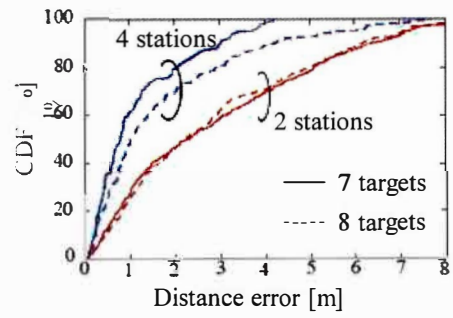
(a) 対象 1 名, 2 名の場合



(b) 対象 3 名, 4 名の場合



(c) 対象 5 名, 6 名の場合



(d) 対象 7 名, 8 名の場合

図 2.22: 位置推定誤差の CDF (実験)



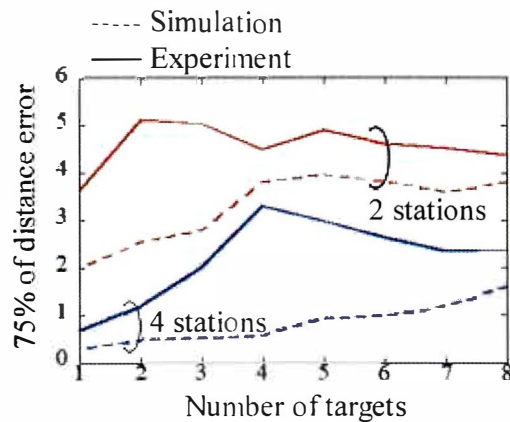


図 2.23: 人数に対する位置推定誤差の 75% 値

図 2.23 に人数に対する位置推定誤差の 75% 値を示す. 同図の青線は送受信局を 4 局使用したとき, 赤線は 2 局使用したとき, 破線はシミュレーション結果, 実線は実験結果を表す. シミュレーションでは, 人数が増加すると位置推定誤差の 75% 値は増加傾向であることが確認できる. 対象数が 4 名以上の場合, 位置推定誤差の 75% は多少上下する. これは, 対象数が多くなるほど近接や遮蔽する問題が生じるが対象の配置位置の全組み合わせを評価できていないために対象位置に偏りが生じたためであると考えられる. 実験では, 2 局使用時には位置推定誤差の 75% 値は増減が少なく, 4 局使用時には対象 4 名までは対象数が増加すると位置推定誤差の 75% 値は増加し, 5 名以上では減少傾向が確認された. これは, 20 回の試行回数であったため, 1 回の試行結果がシミュレーションと比較し大きな割合を占めたためであると考えられる. 最後に, シミュレーション結果と実験結果を比較すると全人数においてシミュレーション結果が高精度に推定されている. シミュレーションでは対象を点として評価していたため, 後方の対象が遮られる可能性が低い, 実験では対象に大きさがあるため送受信局から近い対象が遠い対象を遮る範囲が広がったため, 測位精度が劣化したと考えられる.

## 2.5 まとめ

本章では, 複数局協調型 MIMO レーダを用いた測位法について述べた. それぞれの送受信局の組み合わせごとに MUSIC スペクトラムを算出し, スペクトラムを乗算することで合成する手法について説明した. 複数局を用いたときのネットワークポロジの違による測位精度を評価するため, スター型とメッシュ型の配置におけるシミュレーションを行った. シミュレーション結果より, 対象が 1 名, 3 名, 5 名の位置推定誤差の 75% 値を比較すると, スター型ではそれぞれ 0.45m, 0.81 m, 2.3 m であるのに対し, メッシュ型はそれぞれ 0.36 m, 0.58 m, 0.95m となり, すべての人数においてメッシュ型配置により誤

差が減少した。次に、複数局を使用することによる多人数の測位精度を評価するため、1~8名の対象が存在する場合において送受信局を1局ずつ使用した2局使用時と2局ずつ使用した4局使用時の測位精度をシミュレーションおよび実験を行った。シミュレーション結果より、1~8名の75%値は2局使用時では1.0m~7.0m、4局使用時では0.36m~2.1mとなり、4局使用することで測位精度が向上した。実験結果も同様に、1~8名の75%値は2局使用時では3.7m~5.1m、4局使用時では0.69m~3.3mとなり、4局使用することで測位誤差が減少した。以上より、複数送受信局を用いることにより多人数の場合であっても測位精度が向上することを確認した。

## 第3章 2次元座標重みづけ関数を用いた生体測位法

本章では2次元座標重みづけ関数を用いた生体測位法を述べる。生体がアンテナから離れると測位誤差が劣化する問題があった。しかし、従来法では被験者と送受信局から対象への伝搬距離を考慮していないため、伝搬距離が長く精度が期待できない組み合わせの送受信局の情報が排除されず、推定精度が劣化するという問題があった。そこで、対象とアンテナとの距離を関数とすることで重みづけを行い、複数送受信局のスペクトラムを距離に応じた信頼度を考慮して合成する。以下では、2次元座標重みづけ関数を用いた生体測位法の原理について述べ、実験により精度評価を行う。

### 3.1 2次元座標重みづけ関数を用いた生体測位法の原理

本章では、送受信局と対象との距離を関数として重みづけを行う。 $M_T$  素子の送信局を  $S_T$  局、 $M_R$  素子の受信局を  $S_R$  局からなる  $(M_R \times S_R) \times (M_T \times S_T)$  MIMO アンテナを想定する。送受信局と対象の距離に応じた正規分布を用いて2次元座標重みづけ関数は

$$f^{(s_R s_T)}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(d^{(s_R s_T)}(x, y) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

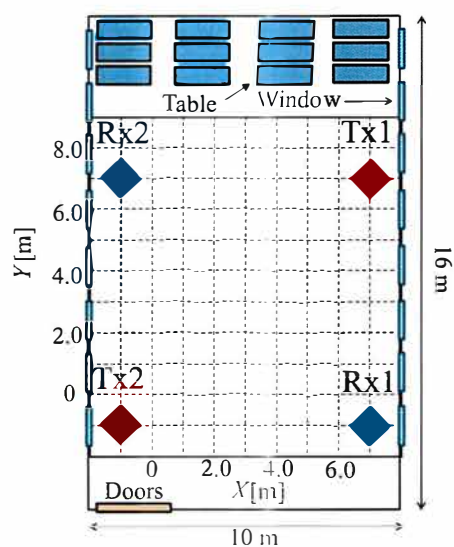
と表す。ここで  $d^{(s_R s_T)}(x, y)$  は  $s_T$  番目の送信局から送信され、対象で反射し、 $s_R$  番目の受信局で受信するまでの距離と送受信局間距離の差である。また、 $\sigma$  は標準偏差、 $\mu$  は平均値を表す。式 (2.15) より、2次元座標重みづけ関数を用いた MUSIC スペクトラムは

$$P_{\text{MUSIC}}(x, y) = \sum_{s_R=1}^{S_R} \sum_{s_T=1}^{S_T} \frac{f^{(s_R s_T)}(x, y)}{\sum_{i=L+1}^{M_R M_T} |\mathbf{a}^{(s_R s_T)H}(x, y) \mathbf{u}_i^{(s_R s_T)}|^2} \quad (3.2)$$

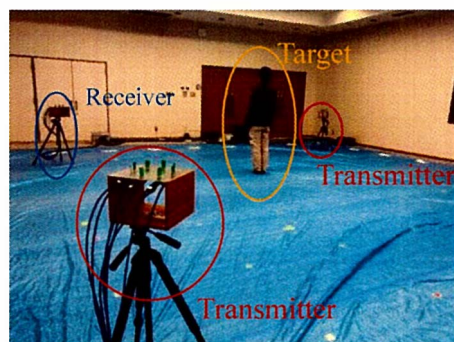
と表される。ここで、 $L$  は人数、 $\mathbf{a}^{(s_R s_T)}(x, y)$  は  $s_T$  番目の送信局から  $s_R$  番目の受信局への2次元球面波モードベクトル、 $\mathbf{u}_i^{(s_R s_T)}$  は固有ベクトルの  $i$  番目の要素を表す。このスペクトラムのピークを求めることで被験者位置を検出する。

## 3.2 屋内実験室における生体測位精度の評価

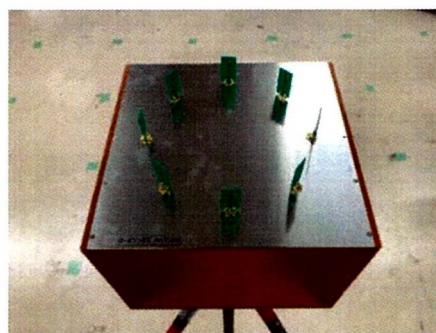
### 3.2.1 実験条件



(a) 実験環境



(b) 実験時の様子



(c) 使用アンテナ

図 3.1: 実験環境と実験時の写真

表 3.1: 実験条件

使用アンテナ	モノポールアンテナ
素子配置	等間隔円形アレー
送信局数 ( $K_T$ )	2 局
受信局数 ( $K_R$ )	2 局
送信素子数 ( $M_T$ )	8 素子
受信素子数 ( $M_R$ )	8 素子
アレー素子間隔	0.5 波長
使用周波数	2.47125 GHz
チャンネル取得周波数	100 Hz
チャンネル測定時間	20.48 秒
抽出する生体周波数	0.1~5.0 Hz
標準偏差	$1 \text{ m} \leq \sigma \leq 20 \text{ m}$
平均値	$0 \text{ m} \leq \mu \leq 10 \text{ m}$
測定対象	1~8 名
測定回数	77 回 (1 名) 20 回 (2~8 名)

図 3.1 に本実験の実験環境と実験時の写真, 表 3.1 に実験条件を示す. 本実験は縦 16 m × 横 10 m の屋内実験室のうち縦 8 m × 横 8 m を測定範囲として使用した. 8 素子のオムニアンテナを円形アレー配置した送受信局をそれぞれ 2 局使用した. 送信局を  $(X, Y) \text{ m} = (0, 0) \text{ m}$ ,  $(6, 6) \text{ m}$ , 受信局を  $(X, Y) \text{ m} = (6, 0) \text{ m}$ ,  $(0, 6) \text{ m}$  に配置した. アレー素子間隔を 0.5 波長, 使用周波数を 2.47 GHz, アンテナ高を 1.0 m, チャンネル取得周波数 100 Hz, 抽出する生体活動の周波数範囲を 0.1-5 Hz, 測定時間は 20.48 秒とした. また, 対象を 1 名 ~ 8 名とし, 測定回数は 1 名の場合, 範囲内の全点の 77 回, 2~8 名の場合は被験者をランダムに配置し 20 回行った. 標準偏差は  $1 \text{ m} \leq \sigma < 20 \text{ m}$ , 平均値は  $0 \text{ m} \leq \mu \leq 10 \text{ m}$  とした.

### 3.2.2 実験結果

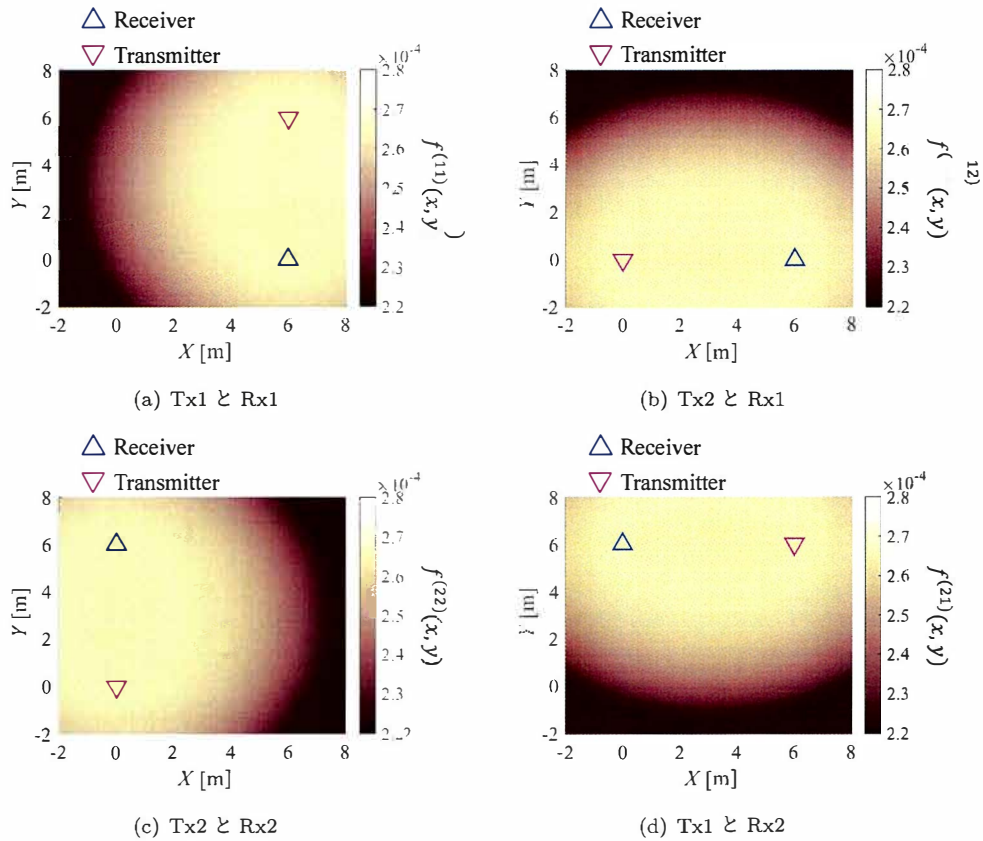


図 3.2:  $\sigma = 15, \mu = 1$  のときの重みづけ分布

図 3.2 に  $\sigma = 15, \mu = 1$  のときの重みづけ分布を示す。同図 (a) は Tx1 と Rx1 の組み合わせ、同図 (b) は Tx2 と Rx1 の組み合わせ、同図 (c) は Tx2 と Rx2 の組み合わせ、同図 (d) は Tx1 と Rx2 の組み合わせ、における重みづけ分布例を示す。図中の  $\nabla$  は送信局を示す、 $\triangle$  は受信局を示す。同図より、送受信局に近い位置では高信頼度となり、遠くなるにつれて低信頼度となる。また従来法として、2 章のような全座標の信頼度が等しい場合を比較対象とした。

図 3.3~3.5 に対象 1 名時、対象 3 名時、対象 8 名時の MUSIC スペクトラム例を示す。図中の  $\circ$  は対象の実位置、 $+$  は推定位置、 $\nabla$  は受信局の位置、 $\triangle$  は送信局の位置を示す。対象が 1 名の場合には、提案法による測位精度の改善を確認できない。これは、対象とアンテナ間の遠近に関わらず比較的高精度に対象位置を推定できたためであると考えられる。対象が 3 名の場合には、送受信局に近いと信頼度が高いために図中の右側の送受信局間に対象が強調されることで全対象の検出が可能となったと考えられる。対象が 8 名の場合であっても、ある送受信局に近い対象は強調されることで図 3.5 上部の対象が検出され、7 名の測位が可能となっている。

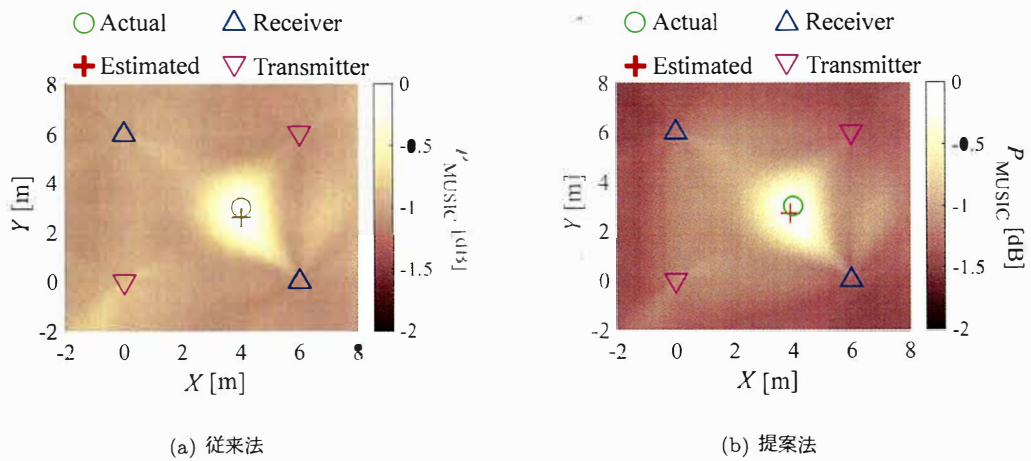


図 3.3: MUSIC スペクトラム例 (対象 1 名時)

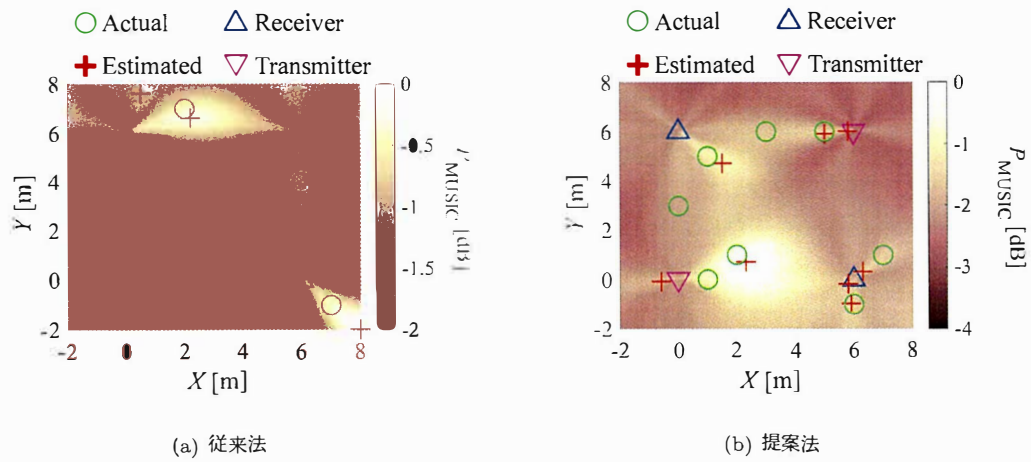


図 3.4: MUSIC スペクトラム例 (対象 3 名時)

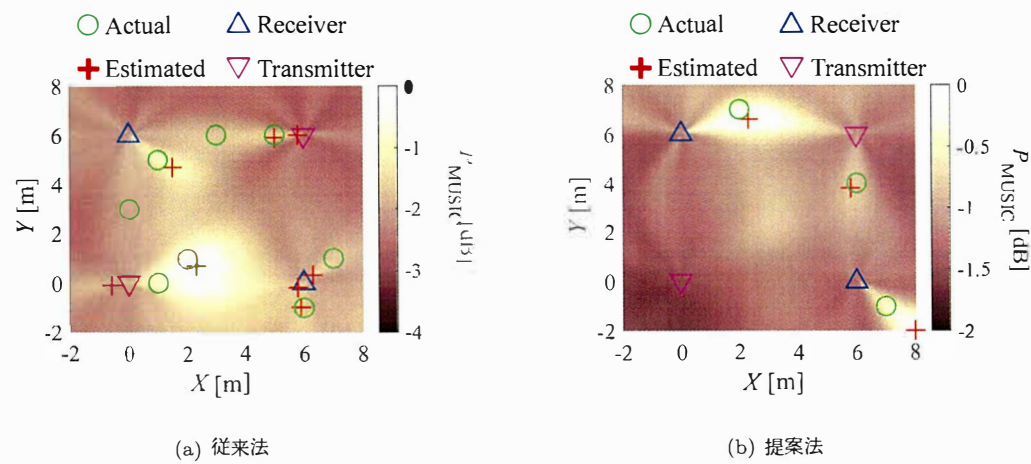


図 3.5: MUSIC スペクトラム例 (対象 8 名時)

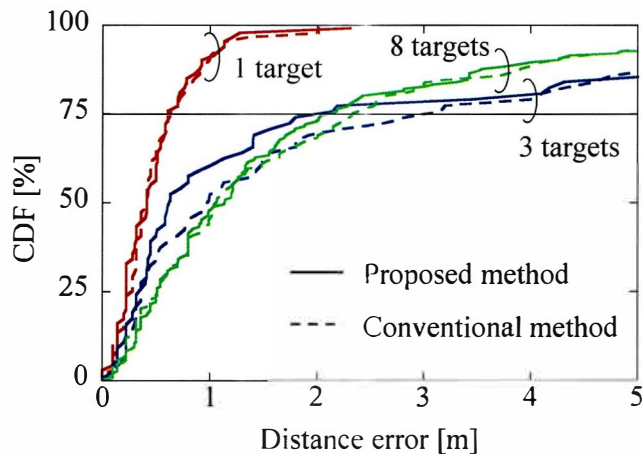


図 3.6: 位置推定誤差の CDF

図 3.6 に位置推定誤差の CDF を示す。同図の実線は提案法、破線は従来法、赤線は対象 1 名時、青線は対象 3 名時、緑線は対象 8 名時を示す。1 名、3 名、8 名時の位置推定誤差の 75% 値を比較すると従来法ではそれぞれ 0.63 m、2.8 m、2.3 m であった。また提案法では、1 名、3 名、8 名時の位置推定誤差の 75% 値はそれぞれ 0.60 m、1.8 m、2.0 m となり、0.03 m、0.8 m、0.3 m の測位精度の向上を確認した。

図 3.7 に  $\sigma$  と  $\mu$  を変化させたときの従来法に対する位置推定誤差の 75% 値の改善量を示す。同図の (a)~(h) はそれぞれ対象 1 名 ~ 対象 8 名の場合の結果である。同図の白色の範囲では従来法がより高精度に検出された場合、赤色は提案法と従来法が同等もしくは提案法がより高精度に検出されている場合である。同図より、 $10 \text{ m} \leq \sigma \leq 20 \text{ m}$ 、 $0 \text{ m} \leq \mu \leq 5 \text{ m}$  の範囲で提案法による測位精度が向上する傾向を確認できる。対象 1 名 ~ 対象 8 名の場合、提案法による各人数の最大の改善量は提案法により 0.03 m ~ 1.4 m となり、2 次元座標重みづけ関数を用いること測位精度が向上することを確認した。

### 3.3 まとめ

本章では、2 次元座標重みづけ関数を用いた生体測位法について述べた。正規分布を用い、送受信局と対象間の距離を関数として重みづけを行う手法について述べ、実験により有効性を確認した。対象が 1 ~ 対象 8 名の場合において実験を行い、重みづけ関数として標準偏差は  $1 \text{ m} \leq \sigma \leq 20 \text{ m}$ 、平均値は  $0 \text{ m} \leq \mu \leq 10 \text{ m}$  の範囲において測位精度を評価した。実験結果より、 $10 \text{ m} \leq \sigma \leq 20 \text{ m}$ 、 $0 \text{ m} \leq \mu \leq 5 \text{ m}$  の範囲において提案法が従来法より高精度に測位が可能であり、各人数の最大の改善量は 0.03 m ~ 1.4 m となり、2 次元座標重みづけ関数を用いることで測位精度の向上を確認した。



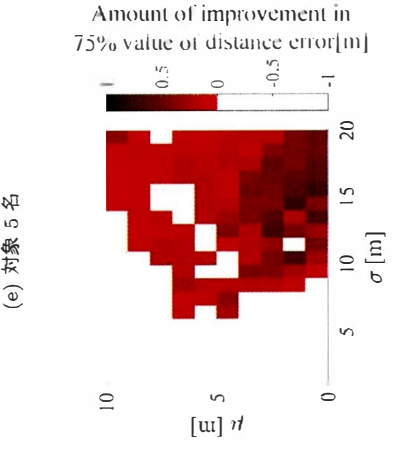
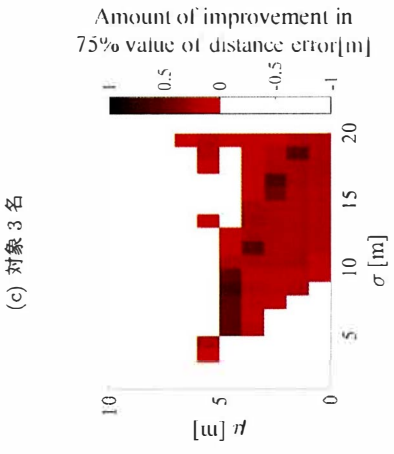
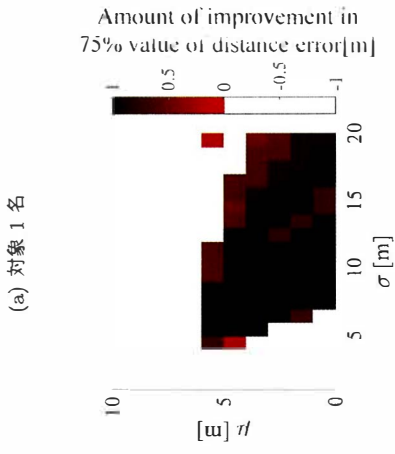
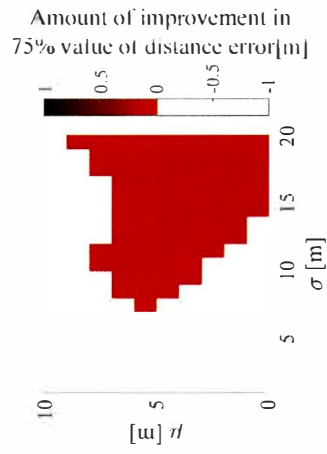
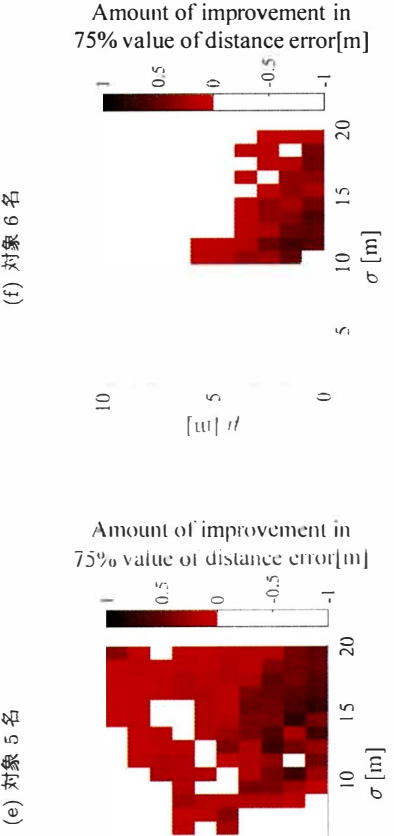
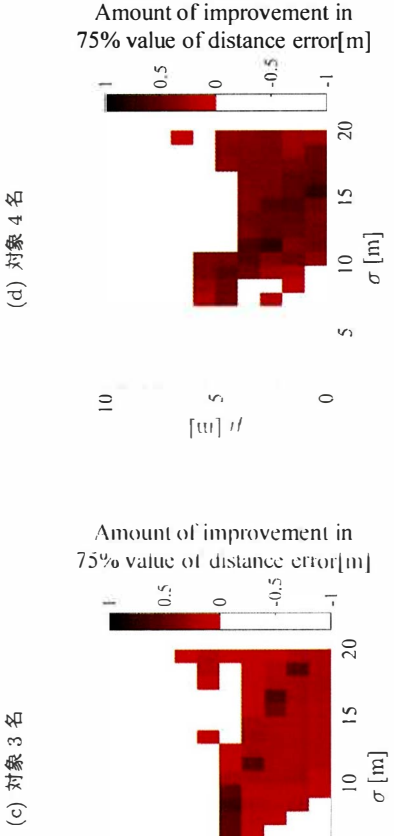
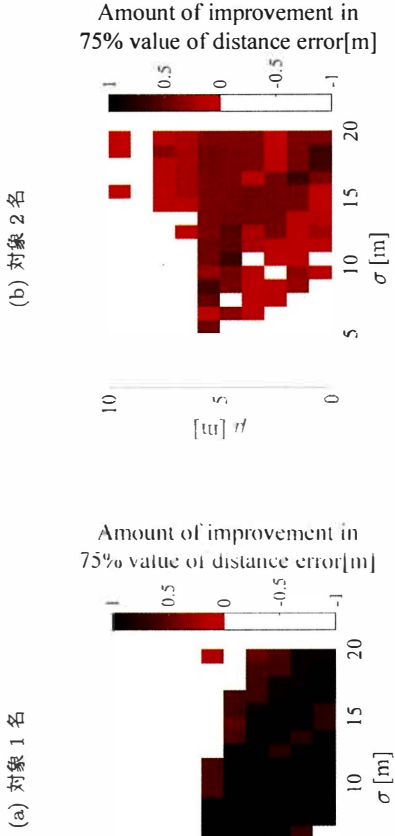
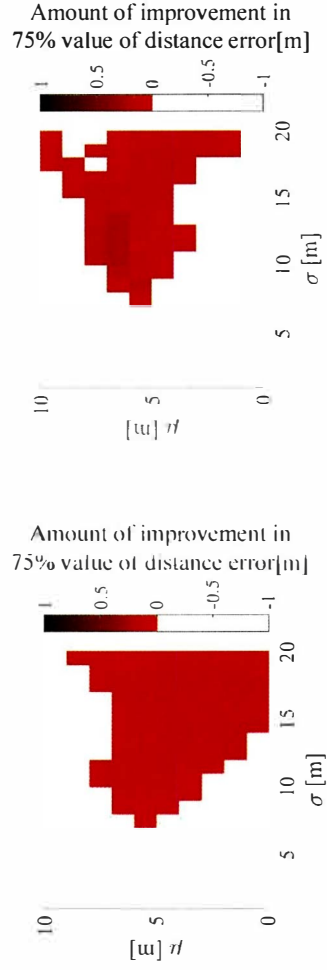


図 3.7: 従来法に対する位置推定誤差の 75% 値の改善量

## 第4章 重みづけ固有ベクトルを用いた生体測位法

本章では、重みづけ固有ベクトルを用いた生体測位法について述べる。従来の MIMO レーダを用いた測位法では、事前に対象の人数が既知である必要があった。しかしながら、対象数を正確に求めることは難しく、複数対象の測位精度の劣化の原因となっている。従来法で使用される MUSIC 法は、対象に対応する方向にヌルを向けることにより方向を推定している。対象に対応するヌルは深く、ノイズに対応するヌルは浅くなり、ランダムな方向に現れる特徴を応用し、固有ベクトルに重みづけを行うことで対象数が未知の場合であっても対象の位置を推定する手法について述べる。以下では、重みづけ固有ベクトルを用いた生体測位法の原理について述べ、実験室にて行った実験より提案手法の精度評価を行う。

### 4.1 重みづけ固有ベクトルを用いた生体測位法の原理

図 4.1 に本手法の概念図を示す。同図では被験者が 2 名の場合を想定する。同図 (a) は被験者を 1 名と仮定した場合のスペクトラム例である。被験者を 1 名と仮定すると 2 名中のどちらかより強く変動する (動きが大きい、アンテナから近い) 対象が推定される。同図 (b) は被験者を 2 名と仮定した場合のスペクトラム例である。被験者を 2 名と仮定すると両被験者が検出される。同図 (c) は被験者を 3 名と仮定した場合のスペクトラム例である。仮定した被験者数が実際の被験者数より多くなる場合、被験者に加えランダムなノイズ方向が推定される。このノイズ方向のスペクトラムは被験者のスペクトラムと比較し浅いスペクトラムとなる。同図 (d) は被験者を 1, 2, 3, ... と仮定し算出した MUSIC スペクトラムを合計した結果である。被験者成分のヌルに対してノイズ成分のヌルは浅く、出現する方向がランダムであるため、合計したスペクトラムも被験者に対応したスペクトラムに対して浅くなる。同図 (e) は同図 (d) の逆数をとったときのイメージ図である。同図 (d) で被験者方向のヌルは深くなるため、逆数をとることにより被験者方向のピークは大きくなる。この大きいピークを生体方向として測位を行う。

本章では、 $M_T$  素子の送信局を  $S_T$  局、 $M_R$  素子の受信局を  $S_R$  局からなる  $(M_R \times S_R) \times (M_T \times S_T)$  MIMO アンテナを想定する。この MIMO アンテナにより取得したチャンネルのうち  $s_T$  番目の送信局と  $s_R$

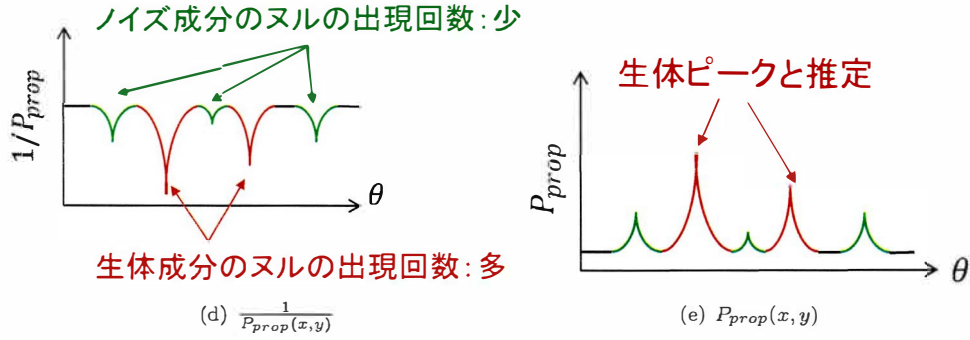
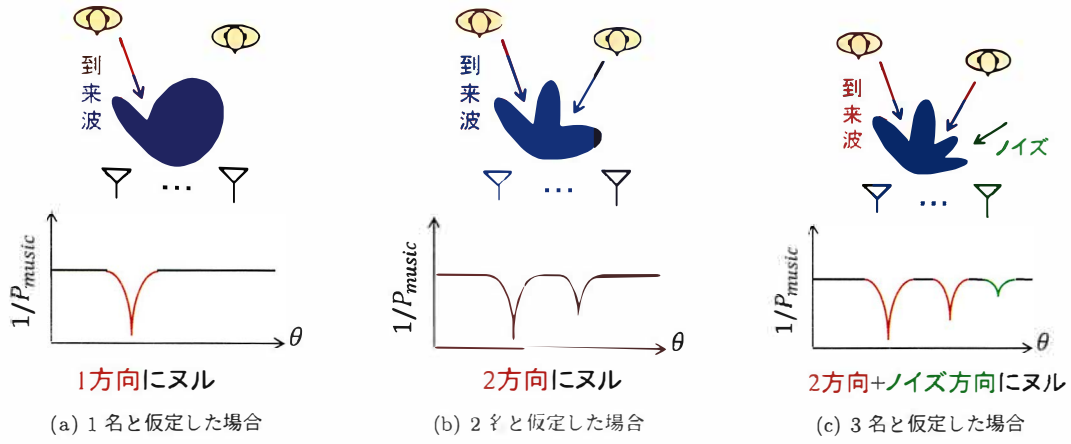


図 4.1: 被験者 2 名の場合のスペクトラム

番目の受信局での固有ベクトル  $\mathbf{U}^{(s_R s_T)}$  は

$$\mathbf{U}^{(s_R s_T)} = [\mathbf{u}_1^{(s_R s_T)}, \mathbf{u}_2^{(s_R s_T)}, \dots, \mathbf{u}_{M_R M_T}^{(s_R s_T)}], \quad (4.1)$$

と表される. これを用いて評価式を

$$P_{prop}(x, y) = \frac{1}{\sum_{s_T=1}^{S_T} \sum_{s_R=1}^{S_R} \sum_{i=2}^{M_R M_T} \left| \mathbf{a}^{(s_R s_T)H}(x, y) \mathbf{u}_i^{(s_R s_T)} \right|^2} \times w_i \quad (4.2)$$

と表す. ここで,  $\mathbf{a}^{(s_R s_T)}$  は  $s_T$  番目の送信局から  $s_R$  番目の受信局への 2 次元球面波モードベクトル,  $\mathbf{u}_i^{(s_R s_T)}$  は固有ベクトル  $\mathbf{U}^{(s_R s_T)}$  の  $i$  番目の要素を表す. このピークを求めることで対象の位置を推定する. また, 固有ベクトルの出現回数に対応した重みづけ関数  $w_i$  は

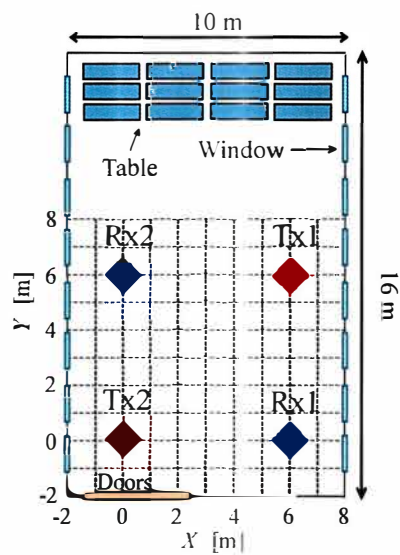
$$w_i = \begin{cases} i-1 & (i \leq L_{\max}) \\ L_{\max} & (i > L_{\max}) \end{cases} \quad (4.3)$$

と表す. ここで,  $L_{\max}$  は想定する最大人数を表す. 例として,  $L_{\max} = 3$  とすると  $i = 2$  のとき  $w_i = 1$ ,  $i = 3$  のとき  $w_i = 2$ ,  $i \geq 4$  のとき  $w_i = 3$  として計算する.

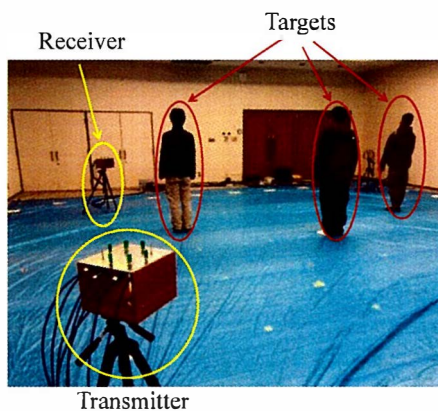
## 4.2 屋内実験室における生体測位精度の評価

本節では、上記の手法により、実際の対象数が未知の場合での対象の測位を実験により評価する。屋内実験室により測定したチャンネルから対象の位置を推定し、提案法と従来法を用いて位置推定誤差の評価を行う。

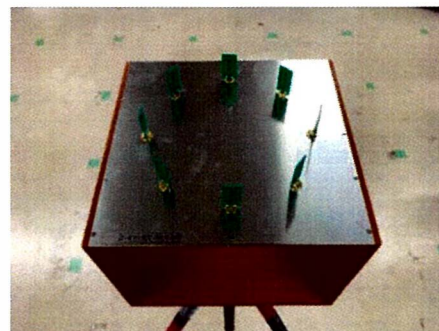
### 4.2.1 実験条件



(a) 実験環境



(b) 実験時の様子



(c) 使用アンテナ

図 4.2: 実験環境と実験時の写真

表 4.1: 実験条件

使用アンテナ	モノポールアンテナ
素子配置	等間隔円形アレー
送信局数 ( $K_T$ )	2 局
受信局数 ( $K_R$ )	2 局
送信素子数 ( $M_T$ )	8 素子
受信素子数 ( $M_R$ )	8 素子
アレー素子間隔	0.5 波長
使用周波数	2.47125 GHz
チャンネル取得周波数	100 Hz
チャンネル測定時間	10.24 秒
抽出する生体周波数	0.1~5.0 Hz
最大想定人数 ( $L_{\max}$ )	1~63 名
測定対象	1~8 名
測定回数	77 回 (1 名) 20 回 (2~8 名)

図 4.2 に本実験の実験環境と実験時の写真, 表 4.1 に実験条件を示す. 本実験は縦 16 m × 横 10 m の屋内実験室のうち縦 8 m × 横 8 m を測定範囲として使用した. 8 素子のオムニアンテナを円形アレー配置した送受信局をそれぞれ 2 局使用した. 送信局を  $(X, Y) \text{ m} = (0, 0) \text{ m}$ ,  $(6, 6) \text{ m}$ , 受信局を  $(X, Y) \text{ m} = (6, 0) \text{ m}$ ,  $(0, 6) \text{ m}$  に配置した. アレー素子間隔を 0.5 波長, 使用周波数を 2.47 GHz, アンテナ高を 1.0 m, チャンネル取得周波数 100 Hz, 抽出する生体活動の周波数範囲を 0.1-5 Hz, 測定時間は 10.24 秒とした. また, 対象を 1~8 名とし, 測定回数は 1 名の場合, 範囲内の全点の 77 回, 2~8 名の場合は被験者をランダムに配置し 20 回行った. 本実験では, 被験者が存在しない場合は考慮せず, 理想的な場合は (送信素子数 × 受信素子数 - 1) が最大検出可能人数であるため, 想定する最大人数  $L_{\max}$  は 1~63 名とした.

## 4.2.2 実験結果

図 4.3~45 にそれぞれ対象が 1 名、3 名、8 名の場合における  $L_{\max} = 10$  としたときの位置推定例を示す。図中の○は対象の実位置、+は推定位置、△は受信局の位置、▽は送信局の位置を示す。図 4.3(a) の従来法では、実際の位置に対して推定位置に誤差を生じているが、同図 (b) では、誤差が減少していることが確認できる。図 4.4 において、従来法では、2 名の位置が分離することができず、1 名に推定されているのに対し、提案法では、2 名の位置を分離して推定することが可能となった。図 4.5 では、従来法では 1 名の位置が推定できず 7 名までの測位にとどまっているが、提案法では誤差を生じるものの対象全員の位置を測位可能である。提案法において、腹部と腕のようにある 1 名の対象に対応する固有ベクトルが複数存在するため、実際の人数より多い固有ベクトルを考慮することで測位精度が向上したと考えられる。

図 4.6 に  $L_{\max} = 10$  としたときの位置推定誤差の CDF を示す。同図の実線は提案法、破線は従来法である。また、赤線は 1 名の場合、青線は 3 名の場合、緑線は 8 名の場合の結果である。同図より、対象 1 名、3 名、8 名の位置推定誤差の 75% を比較すると、従来法は 0.57 m、2.0 m、2.3 m であり、提案法は 0.45 m、0.99 m、2.1 m となり、提案法により 1、3、8 名の位置推定誤差の 75% 値はそれぞれ 0.12 m、1.0 m、0.2 m 改善した。

図 4.7 に  $L_{\max}$  を 1 から 63 まで変化させたときの位置推定誤差の 75% 値を示す。同図 (a)~(h) はそれぞれ対象 1 名~8 名の場合の結果である。また、同図の実線は従来法の結果を示す。図 4.7(a) は 1 名の場合の結果であり、 $L_{\max} = 1$  は従来法と同義である。 $L_{\max} \geq 2$  では、測位精度が向上しており、 $L_{\max}$  が最大値の 63 に近づくとつれて測位精度が劣化する。対象が 2 名以上の場合には、 $L_{\max}$  が実際の人数より少ないときは従来法より誤差が大きくなるが、 $L_{\max}$  が大きくなるにつれて測位精度が向上し、さらに  $L_{\max}$  を大きくし、最大値の 63 に近づくとつれて誤差が大きくなることを確認した。これは、1 名の対象に対応する固有ベクトルが複数存在することで、 $L_{\max}$  が実際の人数より大きくなると測位精度が向上し、さらに増やし (送信素子数  $\times$  受信素子数  $- 1$ ) に近づくとつれてノイズ成分によるピークも増え、測位精度が劣化すると考えられる。以上の結果より、人数が未知の場合であっても  $15 \leq L_{\max} \leq 35$  の範囲に設定することで従来法と同等以上の測位精度を得られることを確認した。

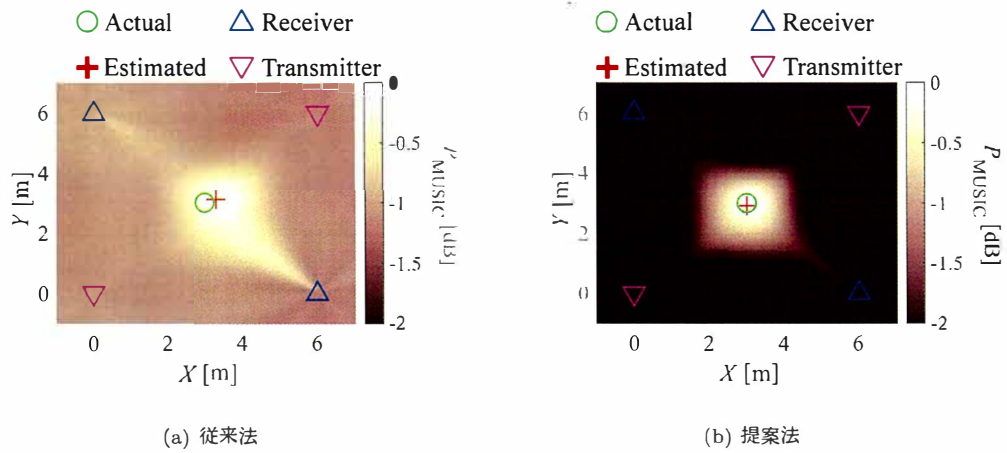


図 4.3: 対象 1 名時の MUSIC スペクトラム例 ( $L_{\text{max}} = 10$ )

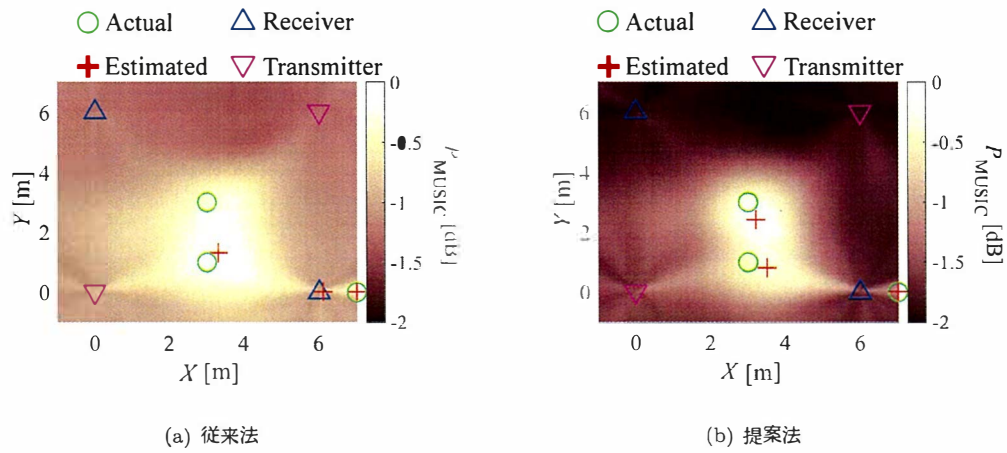


図 4.4: 対象 3 名時の MUSIC スペクトラム例 ( $L_{\text{max}} = 10$ )

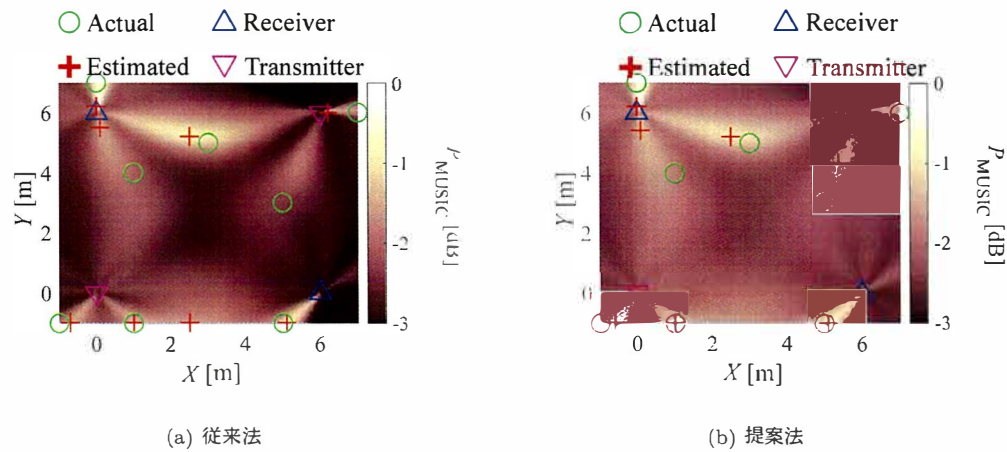


図 4.5: 対象 8 名時の MUSIC スペクトラム例 ( $L_{\text{max}} = 10$ )

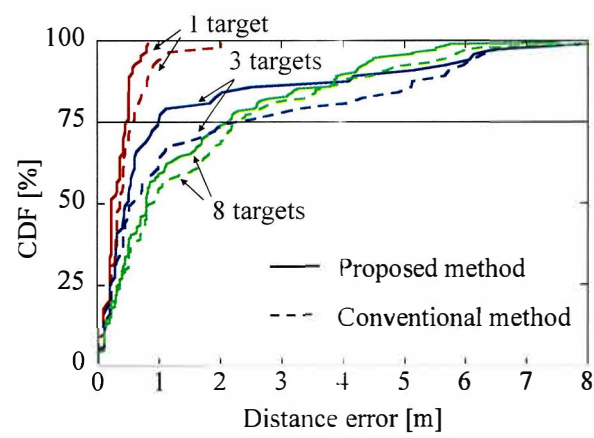
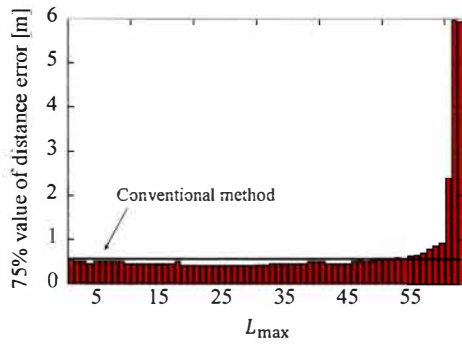
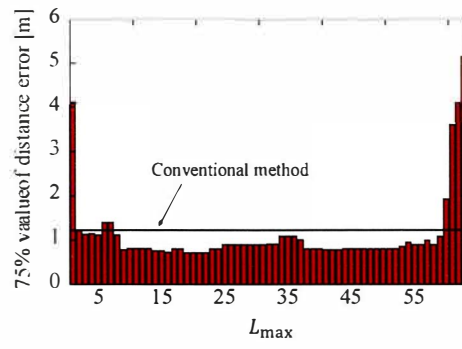


図 4.6: 位置推定誤差の CDF ( $L_{\max} = 10$ )

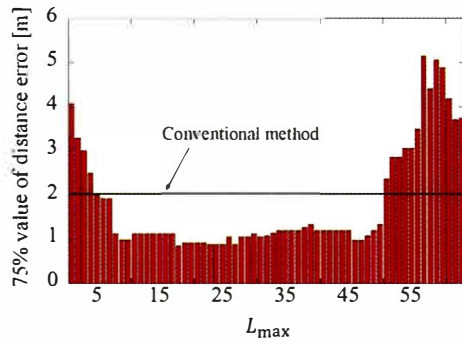




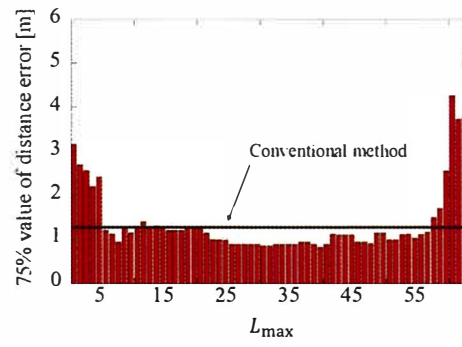
(a) 対象 1 名



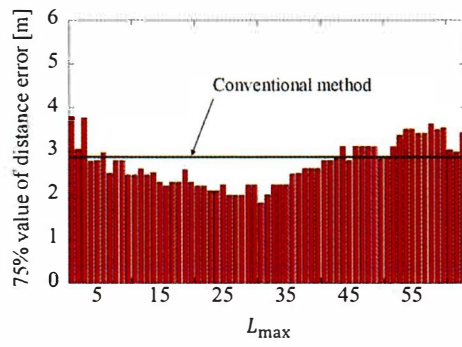
(b) 対象 2 名



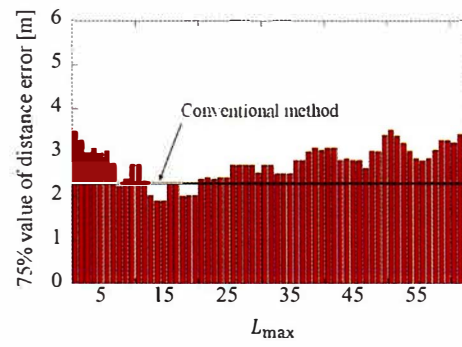
(c) 対象 3 名



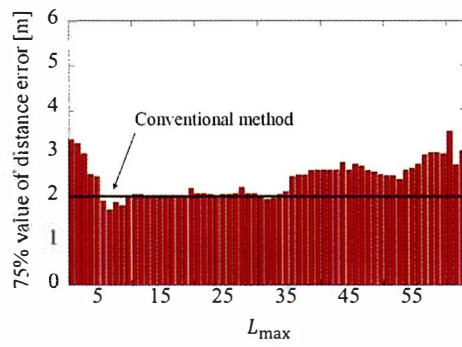
(d) 対象 4 名



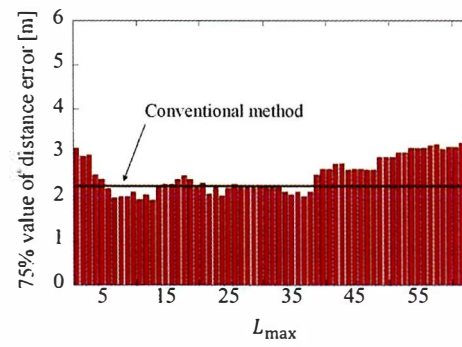
(e) 対象 5 名



(f) 対象 6 名



(g) 対象 7 名



(h) 対象 8 名

図 4.7:  $L_{\max}$  に対する位置推定誤差の 75% 値

### 4.3 まとめ

本章では、重みづけ固有ベクトルを用いた生体測位法について述べた。最大人数  $L_{\max}$  を設定し、対象数が1名の場合、2名の場合...のように  $L_{\max}$  の場合までの対象数を仮定し、それぞれの固有ベクトルに重みづけを行うことで対象数が未知の場合であっても測位が可能となる手法について述べた。実験室による実験結果より、 $L_{\max} = 10$  としたとき、対象1名、3名、8名の位置推定誤差の75%は従来法では0.57 m, 2.0 m, 2.3 m, 提案法では0.45 m, 0.99 m, 2.1 mとなり、提案法によりそれぞれ0.12 m, 1.0 m, 0.2 mの改善を確認した。また、最大人数  $L_{\max}$  を1から(送信素子数 × 受信素子数 - 1)である63まで変化させたとき、 $L_{\max}$  が実際の対象数より大きくなると誤差が減少し、さらに大きくすると誤差が増加し、63に近づくにつれて測位精度が劣化することを確認した。以上より、 $L_{\max}$  を設定し、固有ベクトルに出現回数に応じた重みづけを行うことで対象数が未知の場合であっても対象の測位が可能であることを明らかとした。

## 第5章 チャネル時間応答線形予測と移動速度を考慮した生体位置追従法

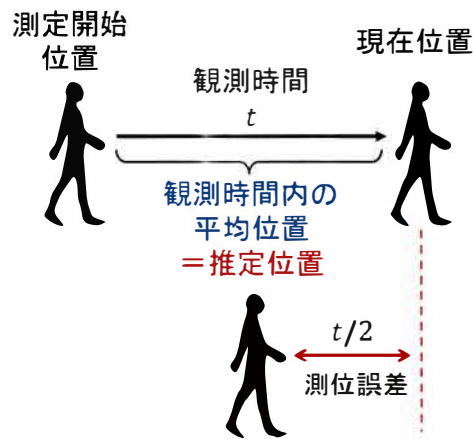


図 5.1: 従来法の問題点

本章では、チャネル時間応答線形予測と移動速度を考慮した生体位置追従法を行う。2章～4章までは、対象が静止している状態を想定して検討を行ってきた。しかし実環境では、対象は移動と静止を繰り返す。そのため、対象の位置を追従することは見守りシステムにおいて重要である。図 5.1 に従来法の問題点を示す。従来法では、観測時間分のデータを用いて測位を行うため、対象が移動する際には観測時間内に移動した経路の平均位置が推定され、遅延により推定位置に誤差を生じる。受信信号の線形予測により、未来のデータを予測することで遅延を減少させる検討が行われているが、対象が複雑に移動する場合には誤差が大きくなる可能性がある。そこで本検討では、チャネル時間応答線形予測に加え、移動速度を推定することで対象位置の補正を行う。以下では、チャネル時間応答線形予測と移動速度を考慮した生体位置追従法の原理について説明し、シミュレーションおよび実験により本手法の有効性を確認する。

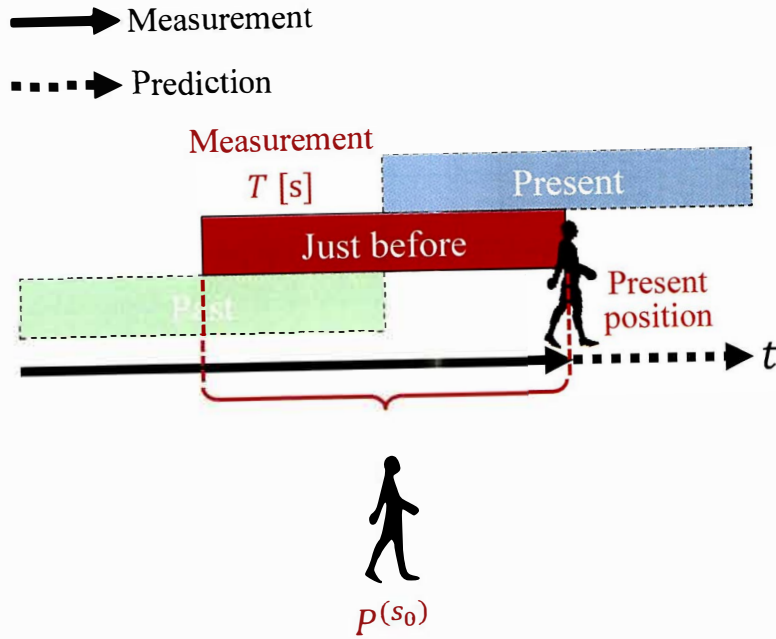


図 5.2: Step1

## 5.1 チャンネル時間応答線形予測と移動速度を考慮した生体位置追従法の原理

本手法では、対象の移動の速度を考慮し、過去、直前、現在の時間の MUSIC スペクトラムを算出し、直前の MUSIC スペクトラムに変換し、調和平均をとることにより対象の位置を推定する。以下では、本手法を全 6 ステップにより説明する。

Step1: 直前の MUSIC スペクトラム  $P^{(S_0)}$  を算出

Step1 では、図 5.2 のように歩行する対象が存在する環境において、直前の時間を  $S_0$  として直前の MUSIC スペクトラム  $P^{(S_0)}$  を算出する。  $M_T$  素子の送信機と  $M_R$  素子の受信機からなる  $M_R \times M_T$  MIMO アンテナを用いて全  $T$  秒間の時変動チャンネルを測定する。このとき、直前の時変動チャンネル  $H^{(S_0)}(t)$  は、

$$\mathbf{H}^{(S_0)}(t) = \begin{pmatrix} h_{11}^{(S_0)}(t) & \dots & h_{1M_T}^{(S_0)}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_R1}^{(S_0)}(t) & \dots & h_{M_R M_T}^{(S_0)}(t) \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

と表される。ここで、 $t$  は時刻を表す。このチャンネルをフーリエ変換を行い生体に対応した周波数範囲を抽出する。この周波数応答行列をベクトル化すると周波数応答ベクトルは

$$\mathbf{f}^{(S_0)}(\omega) = [f_{11}^{(S_0)}(\omega), f_{21}^{(S_0)}(\omega), \dots, f_{M_R M_T}^{(S_0)}(\omega)]^T, \quad (5.2)$$

と表すことができる。ここで、 $\{\cdot\}^T$  は転置を表す。この周波数応答ベクトルから相関行列は

$$\mathbf{R}^{(S_0)} = E[\mathbf{f}^{(S_0)}(\omega)\mathbf{f}^{(S_0)H}(\omega)], \quad (5.3)$$

と表すことができる。ここで、 $\{\cdot\}^H$  は複素共役転置、 $E[\cdot]$  はアンサンブル平均を表す。この相関行列の固有値分解を行うと

$$\mathbf{R}^{(S_0)} = \mathbf{U}^{(S_0)} \mathbf{\Lambda}^{(S_0)} \mathbf{U}^{(S_0)H}, \quad (5.4)$$

$$\mathbf{U}^{(S_0)} = [\mathbf{u}_1^{(S_0)}, \mathbf{u}_2^{(S_0)}, \dots, \mathbf{u}_{M_R M_T}^{(S_0)}], \quad (5.5)$$

$$\mathbf{\Lambda}^{(S_0)} = \text{diag}[\lambda_1^{(S_0)}, \lambda_2^{(S_0)}, \dots, \lambda_{M_R M_T}^{(S_0)}], \quad (5.6)$$

と表される。ここで、 $\mathbf{U}^{(S_0)}$  は直前  $S_0$  の固有ベクトル、 $\mathbf{\Lambda}^{(S_0)}$  は直前  $S_0$  の固有値を表す。この固有ベクトルを MUSIC 法に適用すると

$$P^{(S_0)}(x, y) = \frac{1}{\sum_{n=L+1}^{M_R M_T} |\mathbf{a}^H(x, y) \mathbf{u}_n^{(S_0)}|^2} \quad (5.7)$$

と表すことができる。

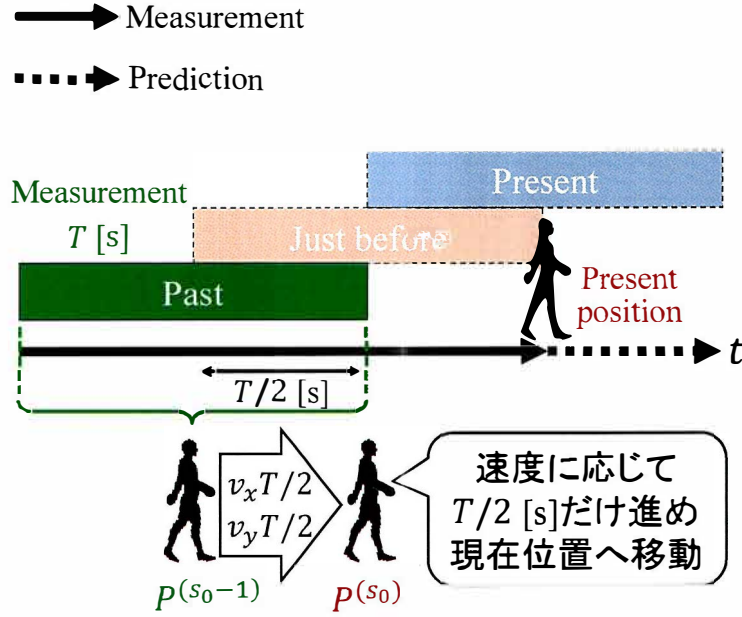


図 5.3: Step2

Step2: 過去の MUSIC スペクトラム  $P^{(S_0-1)}$  を算出

Step2 では、図 5.3 のように過去の MUSIC スペクトラム  $P^{(S_0-1)}$  を算出する。過去のチャンネルは、直前のチャンネルから測定時間  $T$  の半分の  $\frac{T}{2}$  だけ過去の観測チャンネルを使用する。このとき、過去の時変動チャンネル  $H^{(S_0-1)}(t)$  は、

$$H^{(S_0-1)}(t) = \begin{pmatrix} h_{11}^{(S_0-1)}(t) & \dots & h_{1M_T}^{(S_0-1)}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_R1}^{(S_0-1)}(t) & \dots & h_{M_R M_T}^{(S_0-1)}(t) \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

と表される。Step1 と同様の手順で過去の固有ベクトル  $\mathbf{U}^{(S_0-1)}$  を算出する。ここで、直前のチャンネルより  $\frac{T}{2}$  秒だけ過去のチャンネルを用いたため、Step1 と同様に MUSIC スペクトラムを求めると、直前  $S_0$  より  $\frac{T}{2}$  秒だけ過去の MUSIC スペクトラムが算出される。過去から直前への対象の  $X, Y$  座標方向の速度をそれぞれ  $v_x, v_y$  とすると  $\frac{T}{2}$  秒間の移動距離は  $\frac{v_x T}{2}, \frac{v_y T}{2}$  となる。これより、過去の MUSIC スペクトラムを  $\frac{v_x T}{2}, \frac{v_y T}{2}$  だけ進めると直前の MUSIC スペクトラムとなるため、過去の 2 次元球面波モードベクトルを  $\mathbf{a}(x + \frac{v_x T}{2}, y + \frac{v_y T}{2})$  とすると、過去の MUSIC スペクトラム  $P^{(S_0-1)}$  は

$$P^{(S_0-1)}(x, y, v_x, v_y) = \frac{1}{\sum_{n=L+1}^{M_R M_T} \left| \mathbf{a}^H(x + \frac{v_x T}{2}, y + \frac{v_y T}{2}) \mathbf{u}_n^{(S_0-1)} \right|^2} \quad (5.9)$$

と表される。

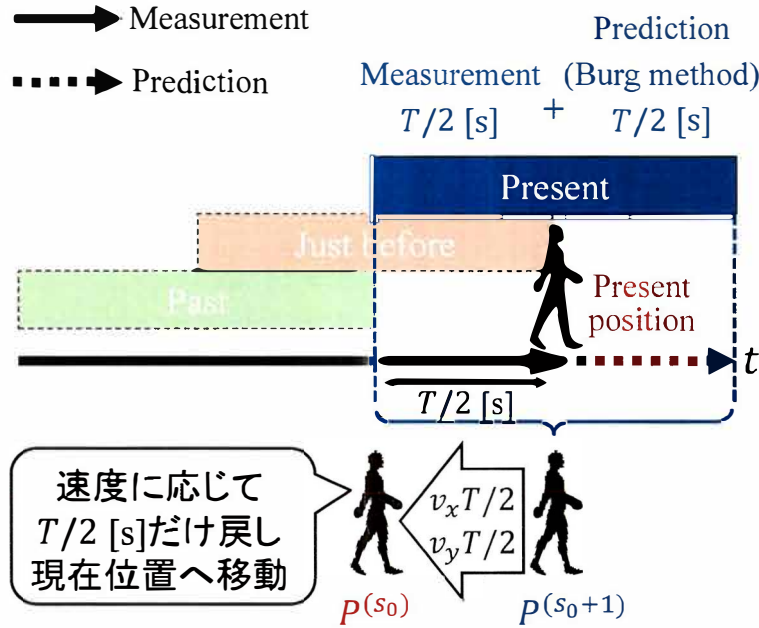


図 5.4: Step3

Step3: 現在の MUSIC スペクトラム  $P^{(S_0+1)}$  を算出

Step3では、図 5.4 のように現在の MUSIC スペクトラム  $P^{(S_0+1)}$  を算出する。現在のチャンネルは、直前のチャンネル  $H^{(S_0)}(t)$  から線形予測法の1つであるバーグ法により予測したチャンネル  $\frac{T}{2}$  秒と直前のチャンネルの後半  $\frac{T}{2}$  秒を合計した  $T$  秒間のチャンネルを使用する。このとき、現在の時変動チャンネル  $H^{(S_0+1)}(t)$  は、

$$H^{(S_0+1)}(t) = \begin{pmatrix} h_{11}^{(S_0+1)}(t) & \dots & h_{1M_T}^{(S_0+1)}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_R 1}^{(S_0+1)}(t) & \dots & h_{M_R M_T}^{(S_0+1)}(t) \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

と表される。これを Step1, 2 と同様にして現在の固有ベクトル  $U^{(S_0+1)}$  を算出する。ここで、Step2 のように現在の MUSIC スペクトラムを直前の MUSIC スペクトラムへの変換を行う。現在の MUSIC スペクトラムを  $\frac{v_x T}{2}$ ,  $\frac{v_y T}{2}$  だけ戻すことにより直前の MUSIC スペクトラムとなる。これより、現在の 2次元球面波モードベクトルを  $\mathbf{a}(x - \frac{v_x T}{2}, y - \frac{v_y T}{2})$  とすると、現在の MUSIC スペクトラム  $P^{(S_0+1)}$  は

$$P^{(S_0+1)}(x, y, v_x, v_y) = \frac{1}{\sum_{n=l+1}^{M: M_T} \left| \mathbf{a}^H(x - \frac{v_x T}{2}, y - \frac{v_y T}{2}) \mathbf{u}_n^{(S_0+1)} \right|^2} \quad (5.11)$$

と表される。

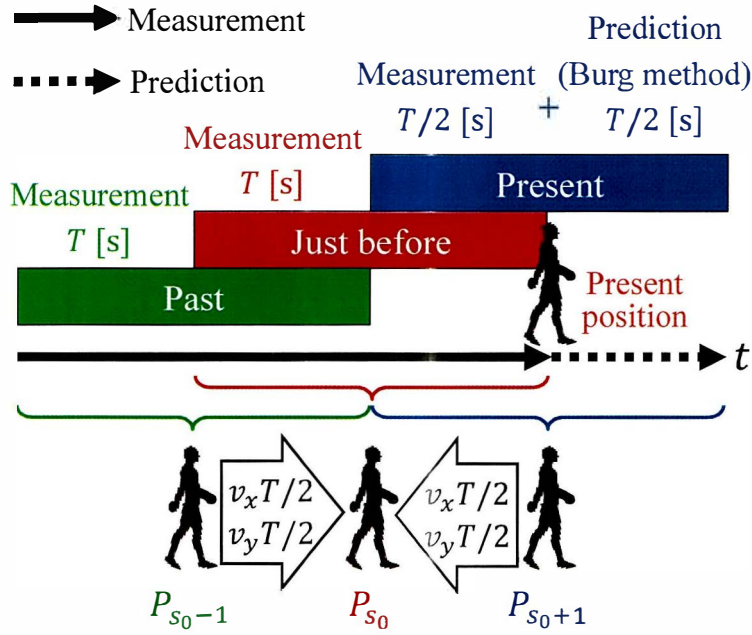


図 5.5: Step4

Step4: 全時間の MUSIC スペクトラムを合成

Step4 ではこれまでに算出した過去，直前，現在の MUSIC スペクトラムの合成を行う．これまでに算出した MUSIC スペクトラムは直前位置へ変換した．そのためこれらを合成すると直前位置となる．直前の時間を基準とし， $s$  番目の時間の MUSIC スペクトラムは

$$P^{(s)}(x, y, v_x, v_y) = \frac{1}{\sum_{n=L+1}^{M_R M_T} |\mathbf{a}^H(x - x^{(s)}, y - y^{(s)}) \mathbf{u}_n^{(s)}|^2}, \quad (5.12)$$

$$x^{(s)} = \frac{v_x T}{2}(s - S_0), \quad (5.13)$$

$$y^{(s)} = \frac{v_y T}{2}(s - S_0), \quad (5.14)$$

と表される．例えば，直前の時間は  $S_0$  であるため移動距離は  $x^{(S_0)} = y^{(S_0)} = 0$  となる．また，過去の時間は  $S_0 - 1$  であるため， $X$  座標の移動距離は  $x^{(S_0-1)} = -\frac{v_x T}{2}$ ， $Y$  座標の移動距離は  $y^{(S_0-1)} = -\frac{v_y T}{2}$  となり，2次元球面波モードベクトルは  $\mathbf{a}(x + \frac{v_x T}{2}, y + \frac{v_y T}{2})$  となる．これらの MUSIC スペクトラムを

$$P_{all}(x, y, v_x, v_y) = \frac{1}{\sum_{s=1}^S \frac{1}{P^{(s)}(x, y, v_x, v_y)}} \quad (5.15)$$

のように合成する．



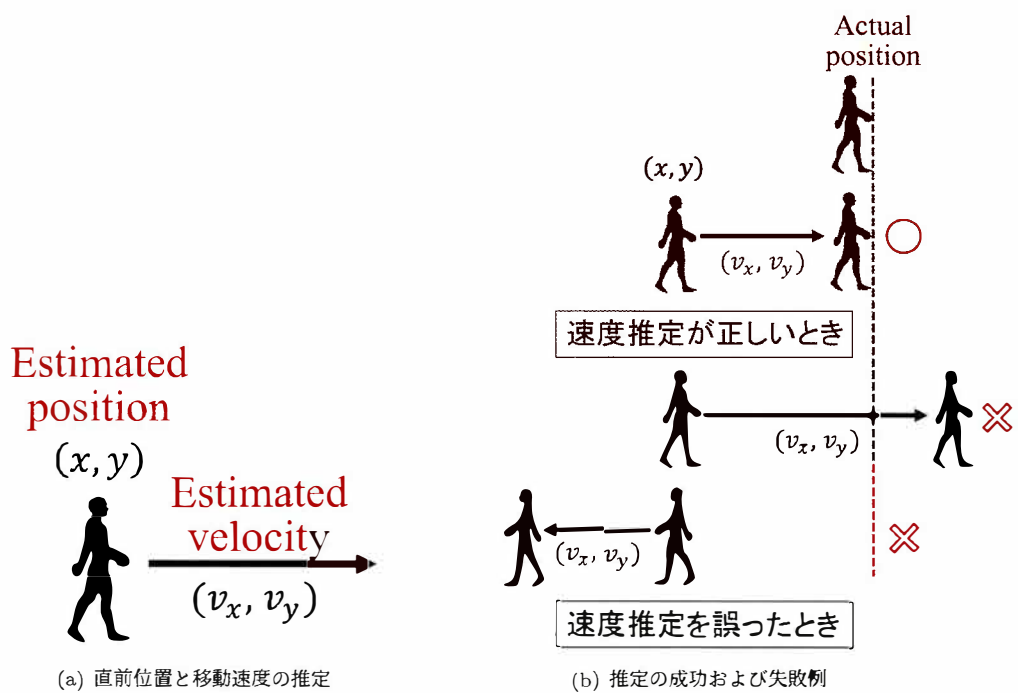


図 5.6: Step5

Step5: 直前位置と移動速度を推定

Step4にて合成したスペクトラムのピークを求めることで図5.6(a)のように直前  $S_0$  の位置、速度を算出する。また、直前  $S_0$  の位置と実際の直前位置には  $\frac{T}{2}$  秒の遅延が生じる。そのため、算出した位置と速度により位置の補正を行う。同図(b)のように位置および速度の推定が正しい時は正しい位置に推定されるが、推定速度が大きすぎたり、逆向きに推定される場合には位置を正しく補正することができないため、速度推定精度も重要となる。

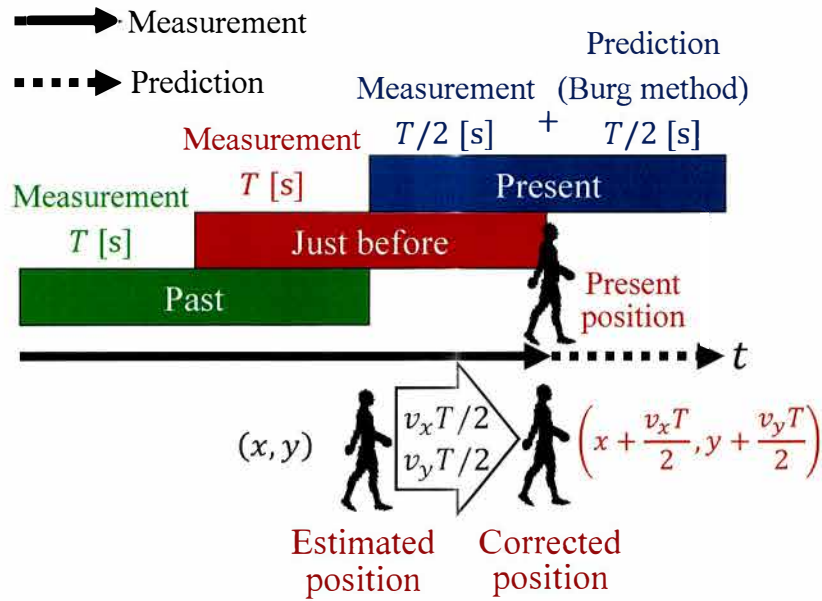


図 5.7: Step6

Step6: 推定位置を移動速度により補正

Step5 で算出した推定速度を用いて推定位置の補正を行う。上記の通り、直前  $S_0$  の位置と実際の直前位置には  $\frac{T}{2}$  秒の遅延が生じるため直前の推定位置  $(x, y)$  を未来の方向に  $(\frac{v_x T}{2}, \frac{v_y T}{2})$  だけ進めると補正位置は  $(x + \frac{v_x T}{2}, y + \frac{v_y T}{2})$  となる。以下では、実際の位置と求めた補正位置との誤差をシミュレーションおよび実験により評価することで提案法の有効性を示す。また、本手法は複数送受信局にも応用可能である。2章で述べたようにある送受信局の組み合わせで MUSIC スペクトラムを算出し、すべての送受信局の MUSIC スペクトラムを乗算することで合成可能である。

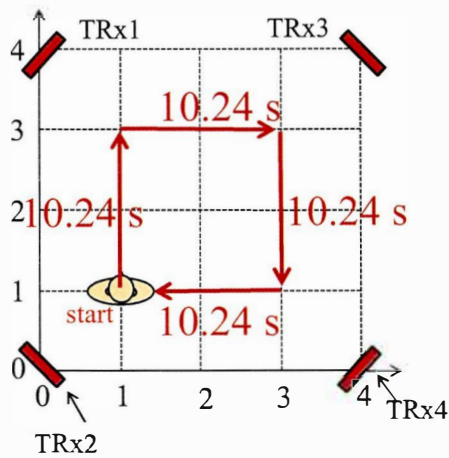


図 5.8: シミュレーション環境

図 5.9: シミュレーション条件

使用アンテナ	モノポールアンテナ
素子配置	リニアアレー
送信局数 ( $K_T$ )	4 局
受信局数 ( $K_R$ )	4 局
送信素子数 ( $M_T$ )	4 素子
受信素子数 ( $M_R$ )	4 素子
使用周波数	2.47125 GHz
測定に用いる時間 ( $T$ )	5.12 秒
予測時間 ( $T/2$ )	2.56 秒
チャンネル測定時間	40.96 秒
抽出する生体周波数	0.3~5.0 Hz

## 5.2 シミュレーションによる生体位置追従精度の評価

本節では、シミュレーションによる生体位置追従精度の評価を行う。対象を点と想定し、等速で移動させた場合の位置追従精度を評価する。

### 5.2.1 シミュレーション条件

図 5.8 に本シミュレーションのシミュレーション環境、表 5.9 にシミュレーション条件を示す。本シミュレーションは 4 m×4 m の範囲を想定した。4 素子のモノポールをリニアアレー配置した送受信局をそれぞれ 4 局ずつ  $(X, Y) = (0 \text{ m}, 4 \text{ m}), (0 \text{ m}, 0 \text{ m}), (4 \text{ m}, 4 \text{ m}), (4 \text{ m}, 0 \text{ m})$  に配置した。使用周波数は 2.47125 GHz、抽出する生体周波数 0.3~5.0 Hz とした。対象は 2 m×2 m の範囲を 40.96 秒かけて 1 周し、0.5 秒間隔で全 65 回測定を行った。また、比較対象として従来法である直前の時間のみを用いた場合の測位を提案法と同条件下で行った。

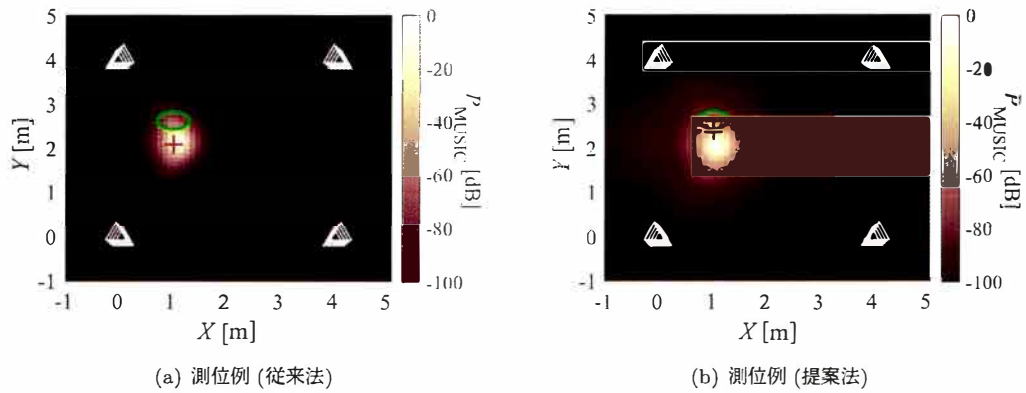


図 5.10: 従来法と提案法における測位例

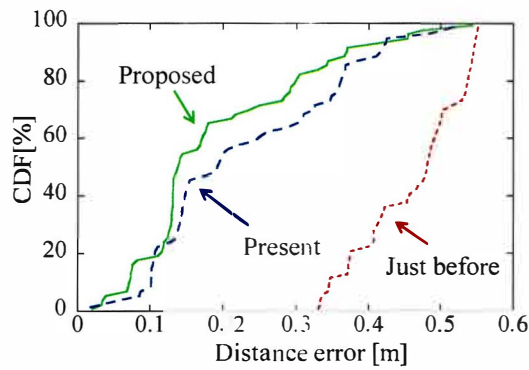


図 5.11: 位置推定誤差の CDF

## 5.2.2 シミュレーション結果

図 5.10 に従来法と提案法における測位例を示す。同図 (a) は従来法による測位例，(b) は提案法による測位例を示す。同図の緑楕円は対象の実際の位置，(a) の赤十字は推定位置，(b) の赤十字は提案法による補正位置を示す。これらの図を比較すると従来法の推定位置は実際の位置に対して遅れていることが確認できるが提案法による補正位置は従来法を比較し対象の位置に近い位置に推定されていることが確認できる。

図 5.11 に位置推定誤差の CDF を示す。同図の緑実線は提案法，青破線は予測部分のみを使用した場合，赤破線は直前の時間のみを使用した場合の位置推定誤差の CDF である。位置推定誤差の 75% を比較すると直前のみは 0.53m，現在のみは 0.35 m であったのに対して提案法では 0.28 m となり，より高精度に測位が可能であることを確認した。

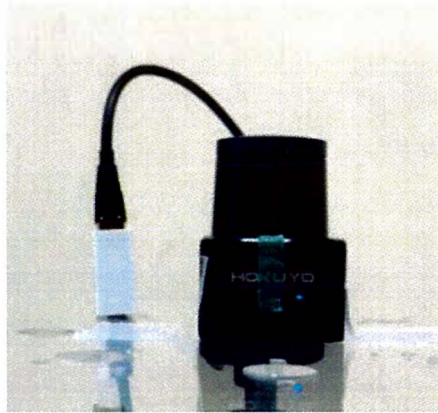


図 5.12: LiDAR

### 5.3 屋内実験室における生体位置追従精度の評価

本節では、屋内実験室における生体位置追従精度の評価を行う。屋内実験室において対象が 8 パターンの経路を移動する環境を想定し、位置追従実験を行った。以下では、実際の位置として用いた LiDAR (Light Detection And Ranging) について説明し、位置の追従精度を評価する。

#### 5.3.1 実験条件

図 5.12 に本実験に使用した LiDAR を示す。実験では、生体が完全に等速で移動することは不可能であるために、対象の実位置を正確に設定することは困難である。本実験では、被験者は設定した速度を目標に歩行し、HOKUYO 社の LiDAR である UST-20LX-H01 を Ground truth 測定に用いた。UST-20LX-H01 の検出範囲は LiDAR 前方を 0 度として  $\pm 135$  度、角度分解能は 0.125 度、検出距離は 20 m、測距精度は  $\pm 40$  mm、データ取得間隔は 25 ms である。

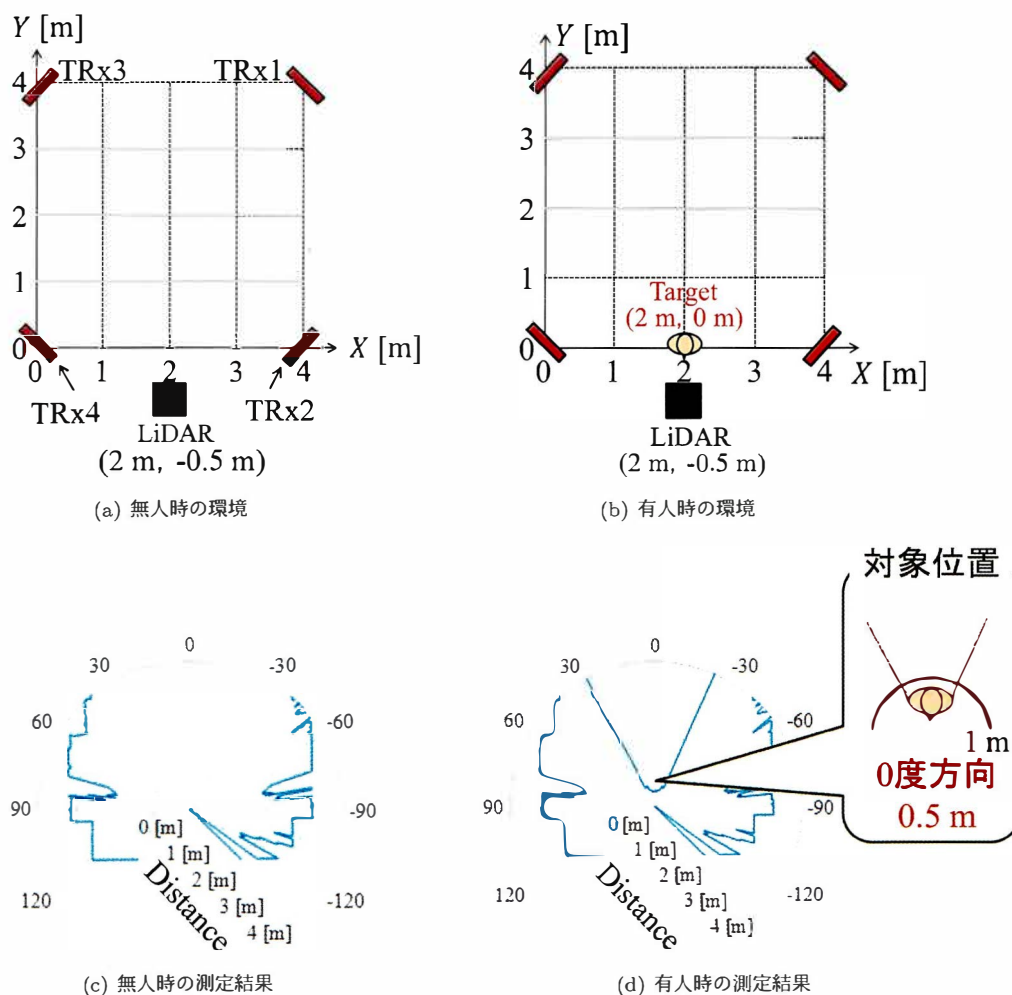
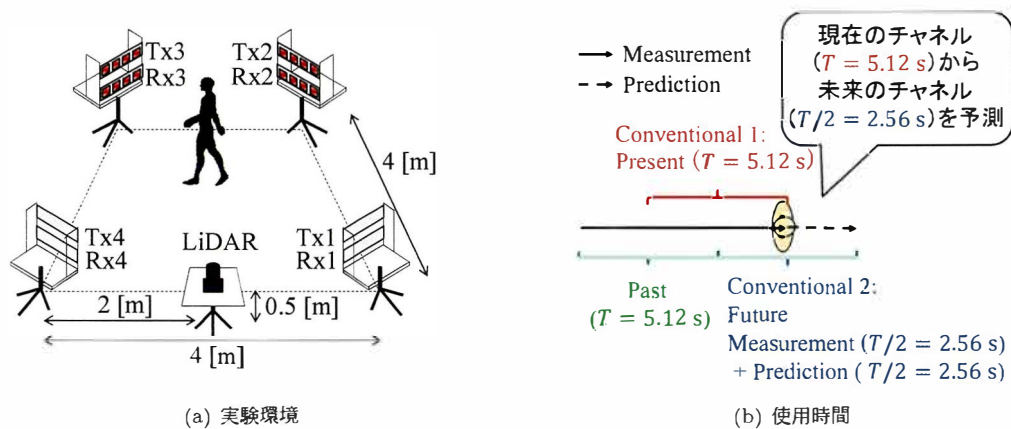
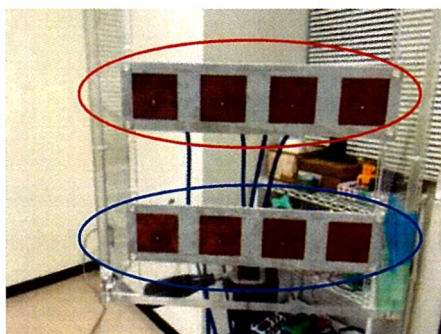


図 5.13: LiDAR による測位法

図 5.13 に LiDAR による測位法を示す。LiDAR による測位は事前に無人環境にて測定を行い、有人時の測定データとの差分を求めることで位置を推定する。同図 (a) は無人時における測定環境を示す。4 m×4 m の屋内環境において LiDAR を  $(X, Y) = (2 \text{ m}, -0.5 \text{ m})$  の位置に配置するとき観測される角度および距離は同図 (c) のようになる。次に、同図 (b) のように  $(X, Y) = (2 \text{ m}, 0 \text{ m})$  の位置に対象が存在するときの測位結果は同図 (d) のようになる。これらの測位結果を比較すると  $-120 \sim 30$  度、 $30 \sim 120$  度間の測位結果は変化せず、 $-30 \sim 30$  度間は大きく変化している。変化が大きくなった角度の中心の方向および距離に対象が存在すると推定する。同図では、LiDAR から見て 0 度方向、0.5 m の位置に対象が存在すると推定されており、LiDAR の位置は  $(X, Y) = (2 \text{ m}, -0.5 \text{ m})$  であるので、対象位置は  $(X, Y) = (2 \text{ m}, 0 \text{ m})$  と推定される。このようにして求めた対象の位置を Ground truth とした。

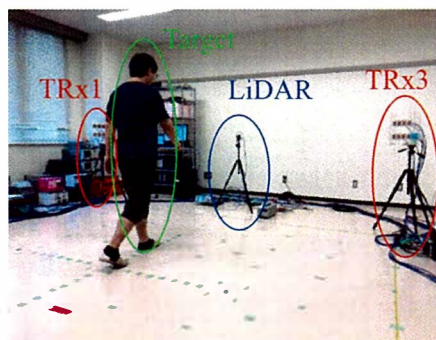


## Transmitter



## Receiver

(c) 使用アンテナ



(d) 実験時の様子

図 5.14: 実験条件および実験時の写真

図 5.14 に実験条件および実験時の写真, 表 5.1 に実験条件を示す. 本実験は, 図 5.14(a) のような  $4\text{ m} \times 4\text{ m}$  の屋内実験室において行った. 図 5.14(c) のように 4 素子のパッチアレーアンテナを送信局, 受信局それぞれに 4 局ずつ用いた  $(M_R \times S_R) \times (M_T \times S_T) = (4 \times 4) \times (4 \times 4)$  MIMO 構成のアンテナを用いた. アンテナ高は  $1.0\text{ m}$ , 使用周波数は  $2.47125\text{ GHz}$  とし,  $(X, Y) = (4\text{ m}, 4\text{ m}), (4\text{ m}, 0\text{ m}), (0\text{ m}, 4\text{ m}), (0\text{ m}, 0\text{ m})$  に送受信局を配置し,  $(X, Y) = (2\text{ m}, -0.5\text{ m})$  の位置に LiDAR を配置した. また, 同図 (b) のように直前のチャネルを  $5.12$  秒, 過去のチャネルは直前のチャネルの前半  $2.56$  秒重複した  $5.12$  秒, 現在のチャネルは直前のチャネルの後半  $2.56$  秒と直前のチャネルから予測した  $2.56$  秒の全  $5.12$  秒を用いて  $0.5$  秒間隔で測位を行った. 本提案法の測位精度を評価するため, 従来法 1 として直前の時間のチャネルのみを用いた測位結果, 従来法 2 として現在の時間のチャネルのみを用いた測位結果を比較対象とした. 図 5.15 に本実験の実験経路, 表 5.2 に各歩行経路の測定距離と測定時間を示す. 本実験は同図の Start 地点から歩行を開始し, 数十秒歩行し Start 地点へ戻る全 8 経路をそれぞれ 3 回測定した. また, 全歩行経

表 5.1: 実験条件

使用アンテナ	パッチアンテナ
素子配置	リニアアレー
送信局数 ( $K_T$ )	4 局
受信局数 ( $K_R$ )	4 局
送信素子数 ( $M_T$ )	4 素子
受信素子数 ( $M_R$ )	4 素子
アンテナ高	1.0 m
使用周波数	2.47125 GHz
測定に用いる時間 ( $T$ )	5.12 秒
予測時間 ( $T/2$ )	2.56 秒
測位間隔	0.5 秒
抽出する生体周波数	0.3-5.0 Hz

表 5.2: 測定距離と測定時間

	Routes							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Distance [m]	16	16	16	16	16	12	12	28
Measurement time [s]	45	45	45	45	85	35	35	75
Number of measurements	3	3	3	3	3	3	3	3
Walking velocity [m/s]	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

路において Start 地点へ戻ってから 5 秒静止した。同図 (a)~(c) は 4 m の直線を 40 秒かけて 2 往復する歩行経路，同図 (d), (e) は 2 m×2 m の正方形を 2 周する歩行経路である。同図 (d) では，40 秒間で経路を 2 周する。同図 (e) では，Route D に加え，正方形の各頂点において 5 秒間静止しながら 80 秒間で経路を 2 周する。同図 (f)~(h) は右左折を繰り返しながら (f), (g) は 30 秒，(h) は 70 秒かけて歩行した。また，全歩行経路において速度目標を 0.4m/s として歩行した。



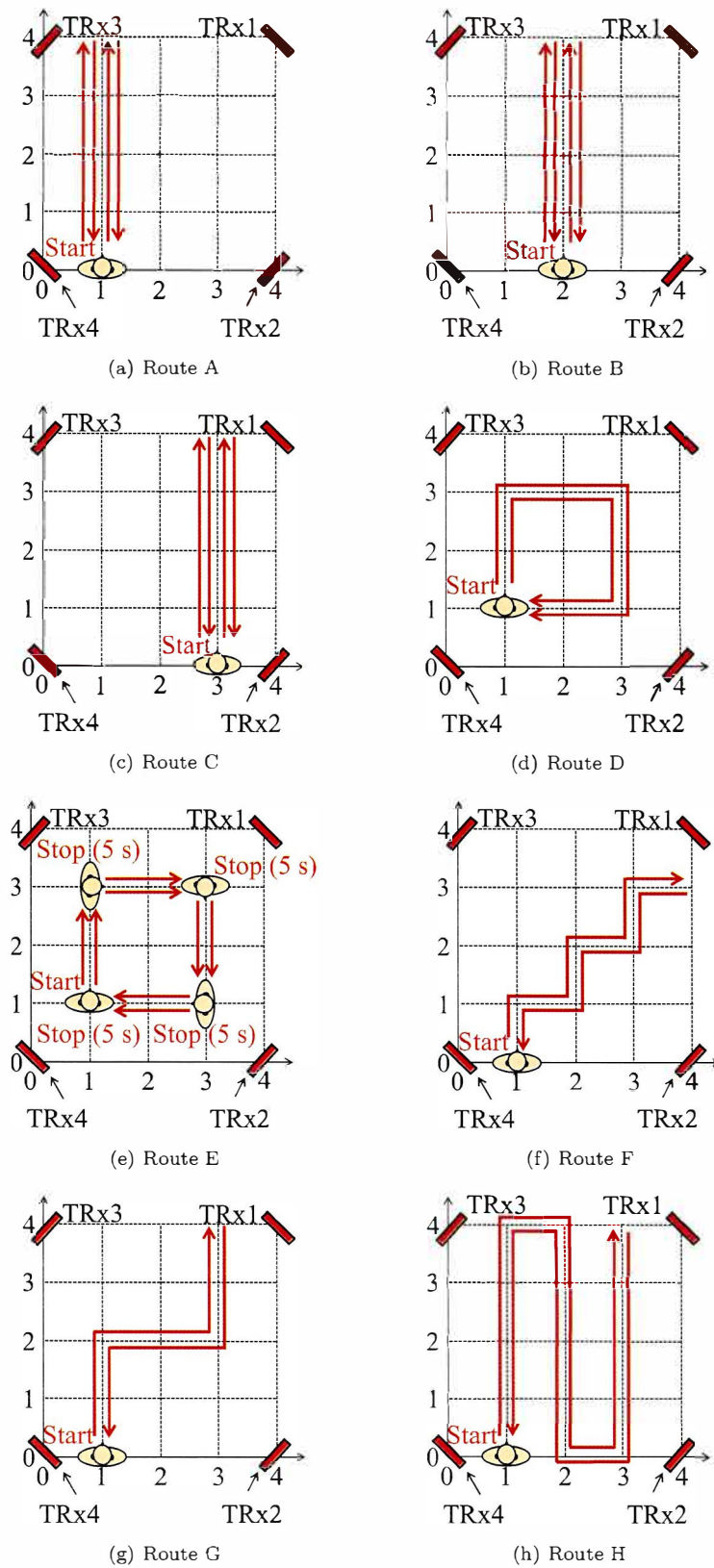


图 5.15: 実験経路

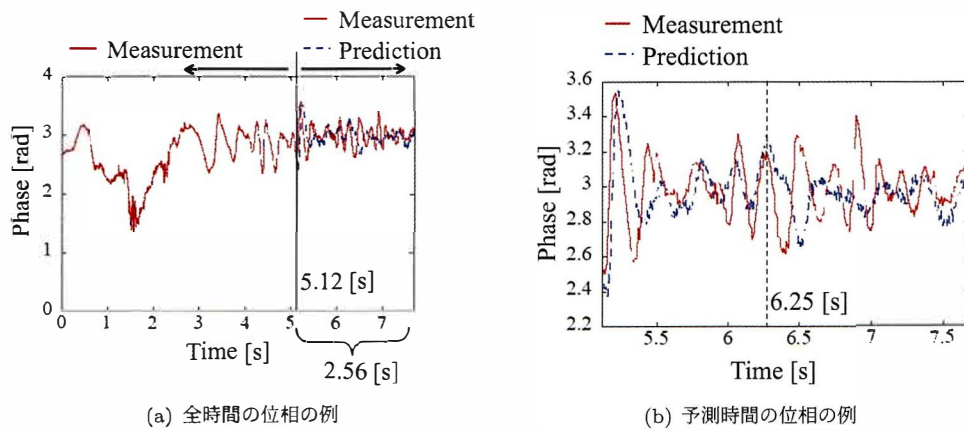


図 5.16: 実測とチャネル予測の位相の例 (Route C)

### 5.3.2 実験結果

図 5.16 に Route C における実測とチャネル予測の位相の例を示す。同図は 2 番目の送信局の 1 番目の送信素子から送信され、4 番目の受信局の 1 番目の受信素子で受信した 5.12 秒の実測チャネルとこのチャネルから予測した 2.56 秒の予測チャネルを合計した 7.68 秒間のチャネルの位相成分である。同図 (a) は全時間の位相の例であり、同図 (b) は同図 (a) から予測開始後の 5.12 秒-7.68 秒を抽出した図である。同図 (b) では、約 6.25 秒までは実測波形と予測波形は似通った結果となったが 6.25 秒以降は誤差が大きくなった。このため、予測時間が長時間になるほど予測と実測に誤差を生じ、測位誤差が大きくなると考えられる。

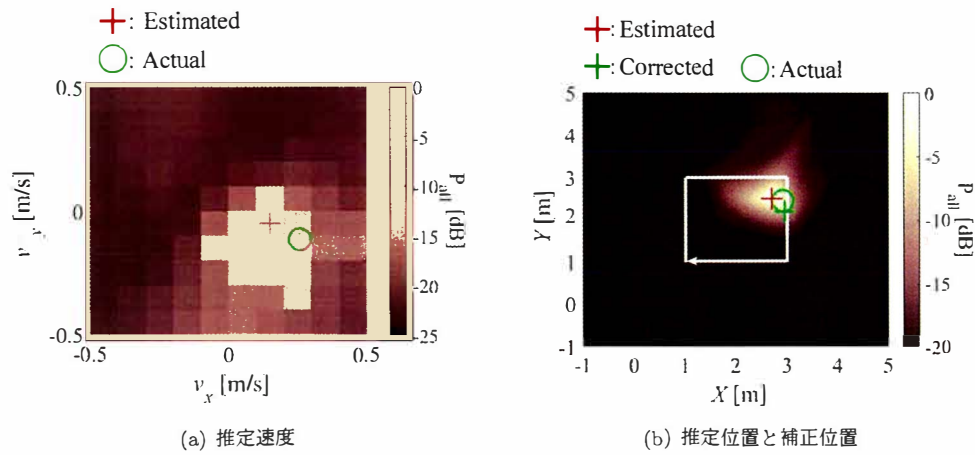


図 5.17: 速度推定による位置補正結果 (Route D)

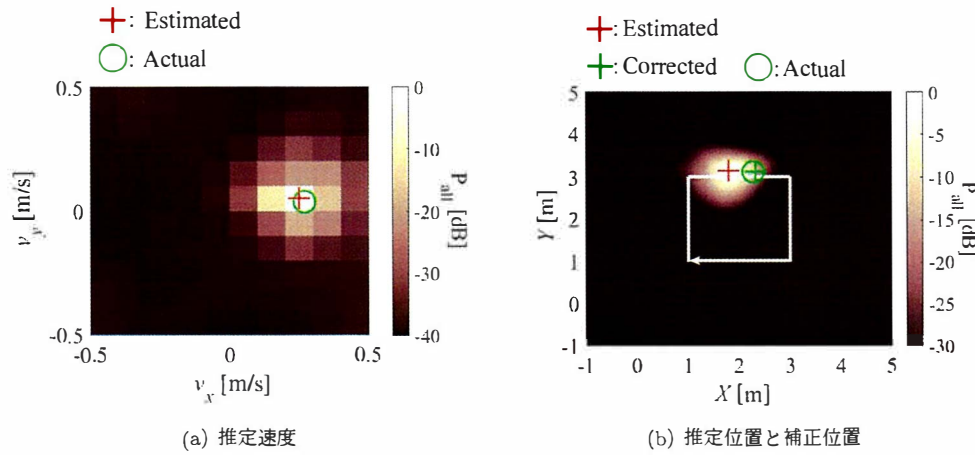


図 5.18: 速度推定による位置補正結果 (Route E)

図 5.17, 5.18 に Route D および Route E における速度推定による位置補正結果を示す。これらの図において (a) は速度推定結果であり、赤十字は推定速度、緑丸は LiDAR によって求めた実際の速度を示す。図 5.17(a) と図 5.18(a) を比較すると Route D では  $X$  座標、 $Y$  座標の両方向に速度推定誤差を生じているのに対し Route E は高精度に速度が推定されている。図 5.17(b), 図 5.18(b) は Route D および Route E における推定位置と補正位置を示す。赤十字は推定位置、緑十字は推定速度による補正位置、緑丸は LiDAR により求めた実際の位置を示す。図 5.17(b) では、補正位置を実際の位置に誤差を生じているが、図 5.18(b) では、高精度に位置が補正されている。これは Route E の速度推定がより高精度であったためである。

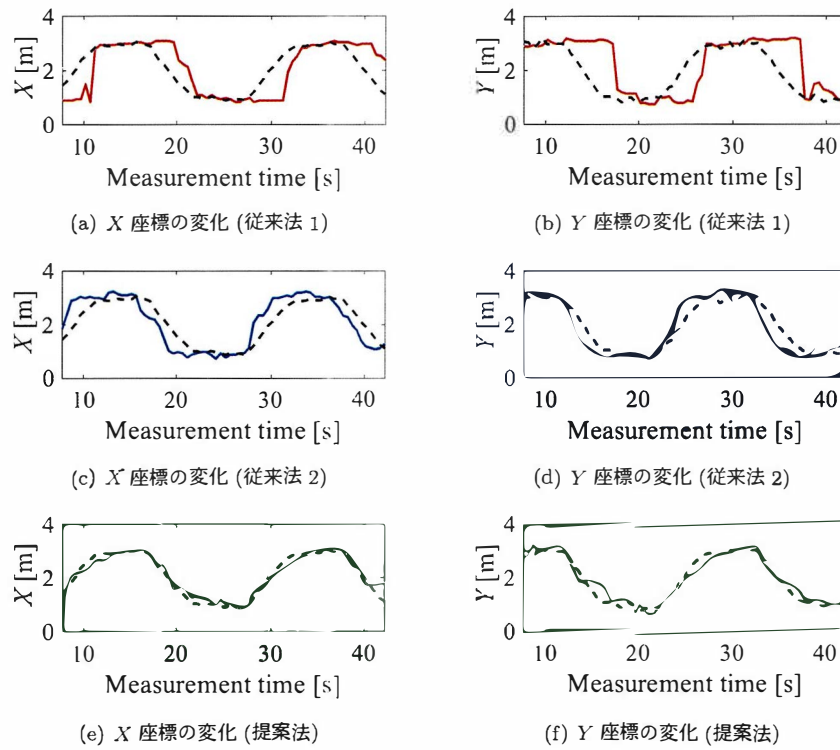


図 5.19: 時間に対する測位例 (Route D)

図 5.19に Route D における時間に対する測位例を示す。これらの図において黒破線は LiDAR によって求めた実際の位置を示す。同図 (a), (b) の赤の実線は直前の時間のチャンネルを用いた場合 (従来法 1) の測位結果を示す。同図では、静止している時間の測位は高精度に推定されているが、歩行中は位置を追従することはできていない。同図 (c), (d) の青の実線は現在の時間のチャンネルを用いた場合 (従来法 2) の測位結果を示す。同図では、従来法 1 と比較すると高精度に推定されているが実際の位置より数秒進んだ位置に推定される。これは、チャンネルの線形予測に誤差が生じるためと考えられる。同図 (e), (f) の緑の実線は提案法による測位結果を示す。提案法では、従来法 1, 2 と比較し実際の位置と同タイミングで同位置に高精度に推定されることが確認できる。

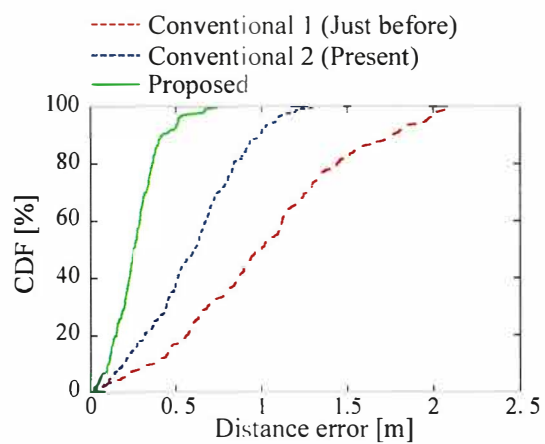


図 5.20: 測位誤差の CDF(Route D)

図 5.20に Route D における測位誤差の CDF を示す. 同図において赤の破線は直前の時間のチャンネルを用いた場合 (従来法 1), 青の破線は現在の時間のチャンネルを用いた場合 (従来法 2), 緑の実線は提案法の結果を示す. 同図において CDF の 75% 値を比較すると従来法 1 は 1.3m, 従来法 2 は 0.80m, 提案法は 0.34m となり, 提案法により高精度に位置の追従が可能であることを明らかとした.

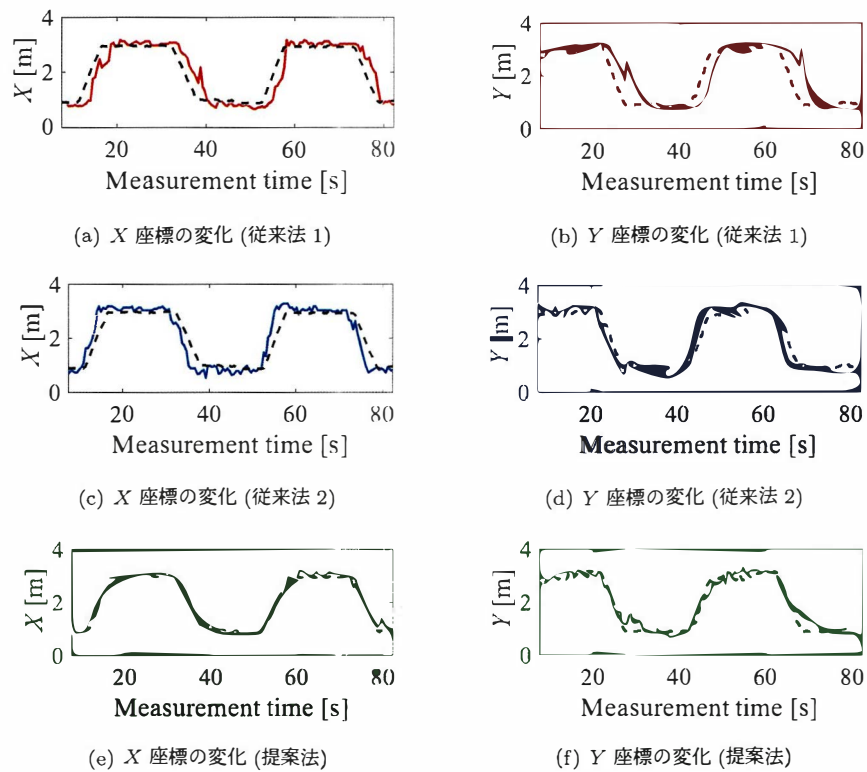


図 5. 21: 時間に対する測位例 (Route E)

図 5. 21 に Route E における時間に対する測位例を示す。これらの図において黒破線は LiDAR によって求めた実際の位置を示す。同図 (a),(b) の赤の実線は直前の時間のチャンネルを用いた場合 (従来法 1) の測位結果を示す。同図では、静止している時間の測位は高精度に推定されているが、歩行中の測位は実際の位置に対して数秒遅れた結果となっていることが確認できる。これは、前記のように測定時間に移動した平均位置に推定されるためである。同図 (c),(d) の青の実線は現在の時間のチャンネルを用いた場合 (従来法 2) の測位結果を示す。同図では、従来法 1 と比較すると高精度に推定されているが実際の位置より進んだ位置に推定される。これは、チャンネルの線形予測に誤差を生じるためだと考えられる。同図 (e),(f) の緑の実線は提案法による測位結果を示す。提案法では、従来法 1,2 と比較し実際の位置と同タイミングで同位置に推定されていることが確認できる。

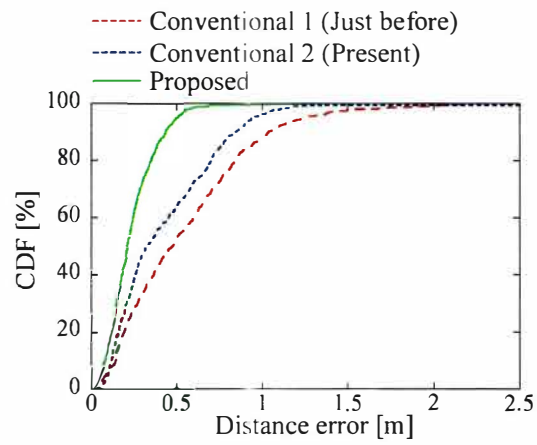


図 5.22: 測位誤差の CDF(Route E)

図 5.22 に Route E における測位誤差の CDF を示す. 同図において赤の破線は直前の時間のチャンネルを用いた場合 (従来法 1), 青の破線は現在の時間のチャンネルを用いた場合 (従来法 2), 緑の実線は提案法の結果を示す. 同図において CDF の 75% 値を比較すると従来法 1 は 0.77 m, 従来法 2 は 0.65 m, 提案法は 0.32 m となり, 提案法により高精度に位置の追従が可能であることを明らかとした.

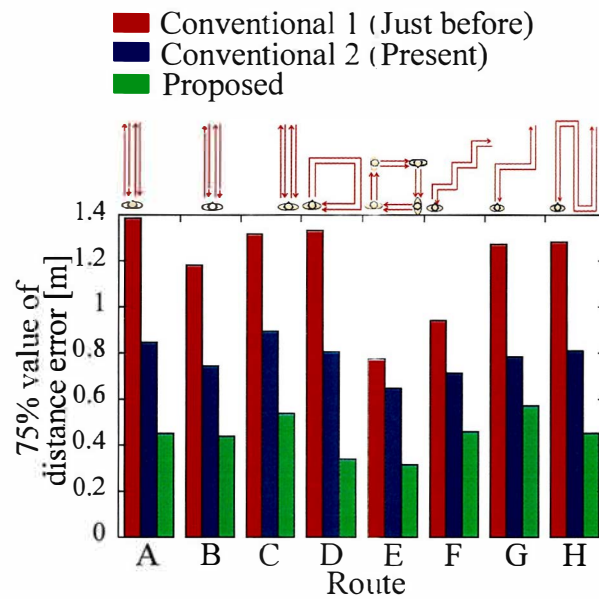


図 5.23: 全歩行経路の測位誤差の 75% 値

図 5.23 に全歩行経路の測位誤差の 75% 値を示す。棒グラフの緑は従来法 1、青は従来法 2、赤は提案法を表す。同図より、全歩行経路の測位誤差の 75% 値比較すると従来法 1 では 0.77 m~1.4 m、従来法 2 では 0.65 m~0.90 m であるのに対し、提案法は 0.32 m~0.57 m となり、提案法を用いることで全経路において測位誤差の 75% 値が小さくなっており、提案法の有効性を確認できる。また、提案法を用いることによる Route D は測位誤差の 75% 値の改善量は、従来法 1 では 0.99 m、従来法 2 では 0.46 m と最も大きくなっている。これは、他の歩行経路とは異なり 2 m ごとに方向転換しているためだと考えられる。Route F, Route G もそれぞれ 1 m、2 m ごとに方向転換しているが、前向き、右向き、前向きのように 2 回前の同方向に移動するため、Route D と比較して従来法と提案法の測位誤差の 75% 値の差が小さくなったと考えられる。また、Route E は従来法 1、従来法 2、提案法の測位誤差の 75% 値はそれぞれ 0.78 m、0.65 m、0.32 m と全歩行経路の中で最も小さくなった。これは、方向転換する際に 5 秒間静止することで遅延の累積が抑制されたためと考えられる。



## 5.4 まとめ

本章では、チャンネル時間応答線形予測と移動速度を考慮した生体位置追従法について述べた。本研究では、時系列として過去、直前、現在の3つの時間を用いた検討を行った。過去、直前は測定データ、現在は線形予測法の1つであるバグ法を用いて直前のデータから予測したデータを用いてそれぞれの時間のMUSICスペクトラムを算出した。各時間と直前の時間との時間差と対象の移動速度から算出した移動距離を考慮し、各時間のMUSICスペクトラムと直前のMUSICスペクトラムと合成し、ピークが最大となる対象位置と移動速度から対象の位置を補正した。シミュレーション結果より、位置推定誤差の75%を比較すると直前のみは0.53 m、現在のみは0.35 mであったのに対して提案法では0.28 mとなった。また、8経路を歩行した実験結果より全経路において直前のみ、現在のみの結果と比較し提案法の誤差の減少を確認し、提案法によりトラッキング精度が向上することを確認した。

## 第6章 結論

本研究では、カメラや赤外線と比較しプライバシーの侵害度が低いマイクロ波生体レーダの高速・高精度化に関する研究について検討を行った。以下では、本研究で取り組んだ検討について記述する。

第1章では、マイクロ波を用いた生体センシングの従来技術について触れ、その特徴と現状について述べた。さらに、近年注目されている生体センシング手法としてMIMOレーダを用いた手法について説明した。その上でこれらの技術の問題点、課題を挙げ、解決法として複数局協調型MIMOレーダを用いた生体位置推定法および生体位置追従法が必要であることを明らかにした。

第2章では、複数局協調型MIMOレーダを用いた測位法について述べた。対象が複数人存在するとき、アンテナから見て前方の対象が後方の対象を遮る問題があり、その解決方法として複数送受信局を用いた位置推定法が効果的であることを述べた。MUSICスペクトラムの合成方法としてある送受信局の組み合わせで算出したMUSICスペクトラムを乗算する手法について説明した。複数送受信局の配置方法として全9局を1送信局-8受信局としたスター型のネットワークトポロジと5送信局-4受信局としたメッシュ型のネットワークトポロジをシミュレーションにより評価した。対象が1名、3名、5名の場合の位置推定誤差の75%値を比較するとスター型はそれぞれ0.45m、0.81m、2.3mとなり、メッシュ型はそれぞれ0.36m、0.8m、0.95mとなり、すべての場合においてメッシュ型とすることで測位精度が改善することが明らかになった。次に、複数送受信局を用いた多人数測位精度をシミュレーションおよび実験により評価した。8名までの対象がいる環境において送受信局をそれぞれ2局ずつ用いて位置推定誤差の75%値を評価した結果、シミュレーションでは、1.0m~7.0m(2局使用時)、0.36m~2.1m(4局使用時)となった。また、同条件での実験では位置推定誤差が3.7m~5.1m(2局使用時)、0.69m~3.3m(4局使用時)となり、送受信局数を増加することで測位精度が向上することを確認した。

第3章では、2次元座標重みづけ関数を用いた生体測位法について述べた。従来のMIMOレーダを用いた測位法には、対象を経由する伝搬距離が増加すると測位精度が劣化する問題がある。しかし、従来法では対象を経由する伝搬距離を考慮していないため精度が低い遠方の送受信局の情報も等しく考慮されるという課題があった。そこで、対象とアンテナとの距離を関数とすることで重みづけを行い、複数送受信局のスペクトラムを距離に応じた信頼度を考慮して合成する手法について述べた。実験により位置推定誤差の80%値を比較した結果、被験者1名の場合には従来法では0.64mであったが、提案法では0.60mと0.04m改善することを確認した。また、被験者2名の場合には2.0mから0.99mと1.0mの改善

を確認した。よって、距離を関数として信頼度を決定することで測位精度が向上することを確認した。

第4章では、重みづけ固有ベクトルを用いた生体測位法について述べた。従来のMIMOレーダを用いた測位法では、事前に対象の人数が既知である必要があった。しかしながら、対象数を正確に求めることは難しく、測位精度の劣化の原因となっている。そこで、被験者を1,2,3,...と仮定しMUSICスペクトラム算出し、合算することで大きなピークを持つ被験者成分を強調し、ランダム方向に発生するノイズ成分を抑制することで対象数が未知の場合であっても測位が可能となる手法を提案した。実験により位置推定誤差の75%値を比較した結果、従来法は0.58 m(被験者1名)、1.1 m(被験者2名)、2.5 m(被験者3名)であったのに対し、提案法は0.41 m(被験者1名)、0.60 m(被験者2名)、1.2 m(被験者3名)となり、提案法により1, 2, 3名の位置推定誤差の75%値はそれぞれ0.17 m, 0.50 m, 1.3 mの改善を確認した。よって、高精度かつ人数情報を必要としない測位が可能であることを明らかとした。

第5章では、チャンネル時間応答線形予測と移動速度を考慮した生体位置追従法について述べた。従来法では、取得情報に平均化処理を行うため、対象が移動する際には測定時間内に移動した経路の平均位置に推定され、直前の位置が推定される問題があった。また、受信信号の線形予測により、未来のデータを予測することで遅延を減少させる検討が行われているが、対象が複雑に右左折を繰り返す場合には誤差が大きくなる可能性があった。そこで、チャンネル時間応答線形予測に加え、移動速度を推定することで対象の位置の補正を行う手法について提案した。対象が移動する場合を想定したシミュレーションおよび8パターンの経路を移動した場合の実験により提案法の有効性を評価した。シミュレーションでは、位置推定誤差の75%を比較すると直前のみは0.53 m、現在のみは0.35 mであったのに対して提案法では0.28 mとなり、より高精度に測位が可能であることを確認した。実験における位置推定誤差の75%は、直前のみは0.77 m~1.4 m、現在のみは0.65 m~0.90 mであるのに対し、提案法は0.32 m~0.57 mとなり、提案法を用いることで全経路において測位誤差の75%値が小さくなり、提案法の有効性を確認した。

以上の複数局協調型レーダを用いた生体センシングに関する研究成果から、実環境に近い環境での測位精度の向上、対象のリアルタイムな位置追従および速度推定が可能であることを確認した。本研究で得られた知見が電波による高齢者見守りシステムの構築に大きく寄与するものと考えられる。

また、本研究における課題として、見通し外環境における実験、アンテナ素子数と送受信局数およびその配置の最適化、複数人同時位置追従の検討が挙げられる。まず見通し外環境における実験において、本研究では縦16 m × 横10 mの見通し環境で実験を行ったが、実際の介護施設では、この範囲内に複数の個室がある。そのため、観測範囲内に見通し外が存在する環境において実験することは実環境により近づくこととなる。また、見通し外環境での測位には送受信局の配置が大きく影響する。見通し環境が多くなるように配置したり、多数の送受信局を配置することで見通し外環境の測位精度が向上すると考えられるが、コストや配置場所による制限が生じる。そこで、最適配置についての検討が今後必要になると考えられる。最後に本研究では、1名の位置追従を行ったが、実際には多人数が同時に移動する。しかし、複数

名が同時に移動するとすれ違う際に対象どうしが入れ替わる可能性があり、人数が増えるとそれぞれの対象を分離して追従することは困難となる。そこで、速度推定を活用し、慣性方向に進むように補正することで入れ替わりの防止これらの課題を解決することで実環境におけるマイクロ波を用いた生体センシングが実現することで、今後のマイクロ波生体レーダの研究のさらなる発展に寄与することを望む。

## 謝辞

本研究にあたり、岩手大学本間尚樹教授には長期に渡り懇切なる御指導、御教示を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。本論文の作成にあたり、ご多忙の中、副査を担当してくださいました、恒川佳隆教授、小林宏一郎教授に深く感謝致します。本研究を進めるにあたり、御支援、御協力を頂いたパナソニック株式会社中山武司氏、同飯塚翔一氏、新潟大学西森健太郎教授、日本工業大学平栗健史教授に深く感謝いたします。本研究にあたり研究室在籍時に御指導頂きました三菱電機株式会社笹川大氏、および本研究の遂行に御協力頂きました Abudusaimi Abuduaini 氏をはじめとする岩手大学本間・村田研究室所属の皆様に感謝致します。最後に、これまで暖かく応援して下さった家族に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] 内閣府 高齢社会白書
- [2] 総務省 統計局 平成 27 年国勢調査
- [3] 厚生労働省 介護人材の確保・介護現場の革新
- [4] S.W Lee and K. Mase, "Activity and location recognition using wearable sensors," IEEE Pervasive Computing, Vol.1, No.3, pp.24-32, Jul. 2002.
- [5] H. Schneiderman and T. Kanade, "A statistical method for 3D object detection applied to faces and cars," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 746-751, June 2000.
- [6] S. Li, L. Zhu, Z. Zhang, A. Blake, H. Zhang and H. Shum, "Statistical learning of multi-view face detection," In European Conference on Computer Vision, pp. 67-81, May 2002.
- [7] 関弘和, 堀洋一, "高齢者モニタリングのためのカメラ画像を用いた異常動作検出," 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2000 年. 情報・システム (2), pp. 417-418, 2000.
- [8] 齊藤光俊, 北園優希, 芹川誠一, "赤外線センサを格子状に配置した人物状態推定センシングシステムの開発," 電気学会論文誌 E, vol.128, No.1, pp.24-25, 2008.
- [9] N. Norbert, N. Herve, T. Rialle, et al. "Monitoring behavior in home using a smart fall sensor and position sensors," Microtechnologies in Medicine and Biology, 1st Annual International Conference On. 2000. IEEE, 200
- [10] 竹之内康希, 田村仁, "LIDAR を用いた対人追従システム," 情報処理学会全国大会, 5ZE-07, Mar. 2020.
- [11] 太田恭平, 大津貢, 太田勇輝, 梶原昭博, "超広帯域無線による高齢者の状態監視センサ," IEEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol. 131, No. 9, pp. 1547 - 1552, 2011.

- [12] 東桂木謙治, 中畑洋一郎, 松波勲, 梶原昭博, “超広帯域無線を用いた呼吸監視特性について,” IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol. 129, No. 6, pp. 1056 - 1061, 2009.
- [13] 西山恵介, 間瀬淳, 近木祐一郎, “マイクロ波アクティブセンサによる生体情報計測,” 電気学会研究会資料. PST, プラズマ研究会. 2005 (37), pp. 41-44, 2005.
- [14] 岩崎智樹, 荒井郁男, “1.5GHz 帯電波による呼吸・心拍計測,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 1997 年. エレクトロニクス (1), 105, 1997.
- [15] O. Boric-Lubecke, V. M. Lubecke, A. Host-Madsen, D. Samardzija, and K. Cheung, “Doppler radar sensing of multiple subjects in single and multiple antenna systems,” Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, 2005., vol. 1, pp. 7 - 11, Sep. 2005.
- [16] J. G. Kim, S. H. Sim, S. Cheon, and S. Hong, “24 GHz circularly polarized doppler radar with a single antenna,” Microwave Conference, 2005 European, vol. 2, pp. 1383 - 1386, Oct. 2005.
- [17] N. Petrochilos, M. Rezk, A. Host-Madsen, V. Lubecke, and O. Boric-Lubecke, “Blind separation of human heartbeats and respiration by the use of a doppler radar remote sensing,” ICASSP 2007, vol. 1, pp. I-333 - I-336, Apr. 2007.
- [18] 大鐘武雄, 小川恭孝, “わかりやすい MIMO システム技術,” オーム社, 2009 年.
- [19] F. Adib, Z. Kabelac, D. Katabi, Robert C. Miller, “3D Tracking via Body Radio Reflections,” Networked Systems Design and Implementation(NSDI'14), pp. 317-329, Apr. 2014.
- [20] F. Adib, Z. Kabelac, and D. Katabi, “Multi-person localization via RF body reflections,” 12th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'15), pp. 279-292, May 2015.
- [21] A. Mase, N. Ito, Y. Komada, A. Kobayashi, T. Shimazu, E. Sakata, and F. Sakai, “Microwave reflectometric measurement of heart-rate variability and stress evaluation,” Asia-Pacific Microwave Conference, Kaohsiung, pp. 625-627, Dec. 2012.
- [22] Y. J. An, B. J. Jang, and J. G. Yook, “Detection of human vital signs and estimation of direction of arrival using multiple Doppler radars.” Journal of The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, vol. 10, no. 4, pp. 250-255, Dec. 2010.
- [23] J. Lin and J. Salinger, “Microwave measurement of respiration,” 1975 IEEE-MTT-S International Microwave Symposium (MTT-S), pp. 285-287, May 1975.

- [24] D. Nagae and A. Mase “Measurement of heart rate variability and stress evaluation by using microwave reflectometric vital signal sensing.” *Review of Scientific Instruments*, 81 (2010) 094301.
- [25] A. Droitcour, V. Lubecke, L. Jenshan and O. Boric-Lubecke, “A microwave radio for Doppler radar sensing of vital signs,” 2001 IEEE International Microwave Symposium (MTT-S), Vol.1, pp. 175-178, May 2001.
- [26] H. Avagyan, A. Hakhoumian, H. Hayrapetyan, N. Pogosyan and T. Zakaryan, “Portable non-contact microwave Doppler radar for respiration and heartbeat sensing,” *Armenian Journal of Physics*, Vol. 5, no.1, pp. 8-14, 2012.
- [27] M. Nango, N. Honma, K. Nishimori, H.p Sato. “Biological activity detection method using MIMO system,” *IEICE Communications Express*, Vol. 2, No. 2, pp. 36-41, Feb. 2013.
- [28] J. Li, P. Stoica, *MIMO radar signal processing*. A John Wiley & Sons, inc., 2009.
- [29] Y. Miao, E. Tanghe, J. Takada, T. Pedersen, P. Laly, D. P. Gaillot, M. Liénard, L. Martens, W. Joseph, “Measurement-based feasibility exploration on detecting and localizing multiple humans using MIMO radio channel properties.” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 3738-3750, Dec. 2019.
- [30] D. Zhu, N. Pang, G. Li and S. Liu, “WiseFi: Activity localization and recognition on commodity off-the-shelf WiFi devices,” 2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems, pp. 562-569, Dec. 2016.
- [31] K. Konno, N. Honma, D. Sasakawa, K. Nishimori, N. Takemura, and T. Mitsui, “Estimating living-body location using bistatic MIMO radar in multi-path environment,” *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E98-B, No. 11, pp.2314-2321, Nov. 2015
- [32] K. Konno, N. Honma, D. Sasakawa, K. Nishimori, N. Takemura, T. Mitsui, and Y. Tsunekawa, “Estimating living-body location using bistatic MIMO radar in multi-path environment,” *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E98-B, No. 11, pp.2314-2321, Nov. 2015
- [33] D. Sasakawa, N. Honma, T. Nakayama, and S.Iizuka, “Fast living-body localization algorithm for MIMO radar in multi-path environment,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 7273-7281, Dec. 2018.



- [34] D. Sasakawa, N. Honma, K. Nishimori, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Evaluation of fast human localization and tracking using MIMO radar in multi-path environment," 27th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, WeB8.4, pp.1148-1153, Sep. 2016.
- [35] T. Miwa, S. Ogiwara, and Y. Yamakoshi. "Localization of living-bodies using single-frequency multistatic Doppler radar system," IEICE transactions on communications, vol.92, No.7, pp. 2468-2476, Jul. 2009.
- [36] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," IEEE Transaction Antenna Propagation, vol. AP-34, pp.276-280. Mar. 1986.
- [37] H. Akaike, "A new look at the statistical model identification," IEEE Trans. Automat. Control, vol. AC-19, pp. 716-723, 1974.
- [38] J. Rissanen, "Modeling by shortest data description," Automatica, vol.14, pp. 465-471, 1978.
- [39] J. Rissanen, "Universal coding, information, prediction, and estimation," IEEE Trans. Information Theory, vol.30, pp. 629-636, 1984.
- [40] M. Wax, T. Kailath, "Detection of signals by information theoretic criteria," IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 33, no. 2, pp. 387-392, Apr. 1985.
- [41] N. A. Baig, M. B. Malik, M. Zeeshan, and M. A. Baig, "High resolution target localization using rotating linear array radar," Multidim Syst Sign Process, vol. 30, pp. 2059-2079, Mar. 2014.
- [42] T. Koda, T. Sakamoto, S. Okumura, and H. Taki. "Noncontact respiratory measurement for multiple people at arbitrary locations using array radar and respiratory-space clustering," arXiv preprint, arXiv:2101.12422, Feb. 2021.
- [43] Y. Okamoto and T. Ohtsuki, "Human activity classification and localization using bistatic three frequency CW radar," 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 4808-4812, Jun. 2013.
- [44] F. Talaei, M. M. Hashemi, and S. Sadri. "Spectrum analysis and blind estimation of number of targets in multiple PRF radars based on the compressive sensing method," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 50, no. 2, pp. 1004-1016, Jul. 2014.

- [45] M. Gardill, J. Fuchs, C. Frank, and R. Weigel. "A multi-layer perceptron applied to number of target indication for direction-of-arrival estimation in automotive radar sensors," in Proceedings of the IEEE 28th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP), Sep. 2018.
- [46] 本間尚樹, 今野恵太, 笹川大, 西森健太郎, 恒川佳隆, "MIMO レーダ推定位置分散特性に基づく生体人数推定法," 信学技報, AP2015-25, pp.37-42. May 2015.
- [47] 白木信之, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一, "複数局協調型 MIMO レーダを用いた生体数推定法," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, CS-2-1, Sep. 2019.
- [48] N. Shiraki, N. Honma, K. Murata, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Estimation method of the number of targets using cooperative multi-static MIMO radar," IEICE Trans. Commun. Vol. E104-B, No. 12, Dec. 2021.
- [49] N. Shiraki, D. Sasakawa, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Cooperative MIMO radar using multiple receiving stations for human localization," 2017 IEEE Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, pp.1509-1510, Jul. 2017.
- [50] N. Shiraki, D. Sasakawa, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Experimental evaluation of localization accuracy of multiple subjects using multiple receiving stations," 12th European Conference on Antennas and Propagation, Apr. 2018.
- [51] 白木信之, 本間尚樹, 村田健太郎, 中山武司, 飯塚翔一, "複数局協調型 MIMO レーダを用いた多人数測位精度評価," 信学技報, AP2021-50. pp. 13-18. Aug. 2021.
- [52] 笹川大, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一, "時間差分チャンネルに基づく MIMO レーダの人物トラッキング性能の評価," 信学技報, AP2016-43. pp. 38-42. Jul. 2016.
- [53] Y. Ding, J. Tang, X. Xu, and J. Zhang, "Application of linear predictive coding for Doppler through-wall radar target tracking," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 12, no. 6, pp. 1317-1321, Jun. 2015.
- [54] A. Soumaré, B. Tavernier, A. Alperovitch, C. Tzourio, and A. Elbaz, "A cross-sectional and longitudinal study of the relationship between walking speed and cognitive function in community-dwelling elderly people," The Journals of Gerontology: Series A, vol. 64A, issue 10, pp. 1058-1065, Oct. 2009.

- [55] K. Saho, K. Uemura, K. Sugano and M. Matsumoto, "Using micro-doppler radar to measure gait features associated with cognitive functions in elderly adults," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24122-24131, Feb. 2019.
- [56] M. Jin, G. Liao, and J. Li, "Joint DOD and DOA estimation for bistatic MIMO radar," *Signal Processing*, vol.89, No.2, pp. 244-251, Feb. 2009.

## 学術論文・外部発表

### 1. 学術論文

- [1] N. Shiraki, Z. Chen, D. Sasakawa, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, “Method of Estimating Human Orientation Using Array Antenna,” MDPI Electronics, 7(6), 92, Jun. 2018.
- [2] N. Shiraki, T. Hiraguri, I. Shitara and N. Honma, “Theoretical Analysis of Interference between Directional Beams in Drone-based 3D Mesh Network,” IEICE Communications Express, vol.9,no.3, pp.72-76, Mar. 2020.
- [3] 佐藤浩, 堀端研志, 白木信之, 本間尚樹, 高橋応明, 小柳芳雄, “直線上に近接配置した3素子モノポールアンテナに対する結合低減検討,” 電子情報通信学会 和文論文誌 B, vol.J104-B, no.6, pp.543-553, Jun. 2021.
- [4] N. Shiraki, N. Honma, K. Murata, T. Nakayama, and S. Iizuka, “Estimation Method of The Number of Targets Using Cooperative Multi-static MIMO Radar,” IEICE Trans. Commun., vol.E104-B, no.12, Dec. 2021.

## 2. 国際会議

- [1] N. Shiraki, D. Sasakawa, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, “Cooperative MIMO radar using multiple receiving stations for human localization,” 2017 IEEE Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, pp.1509-1510, Jul. 2017.
- [2] K. Kishimoto, S. Yonezawa, N. Shiraki, D. Sasakawa, and N. Honma, “Evaluation of vital sign distribution using array antenna,” 2017 International Symposium on Antennas and Propagation, POS3-17.1219, Oct. 2017.
- [3] N. Shiraki, D. Sasakawa, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, “Experimental evaluation of localization accuracy of multiple subjects using multiple receiving stations,” 2018 European Conference on Antennas and Propagation, Apr. 2018.
- [4] N. Honma, D. Sasakawa, N. Shiraki, T. Nakayama, and S. Iizuka, “Human monitoring using MIMO radar,” 2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition, TP1.4, pp.77-78. Aug. 2018,
- [5] N. Shiraki, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, “Estimation method of the number of targets using cooperative MIMO radar,” 2019 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2019), IF-45, pp.666-668, Dec.2019.
- [6] A. Abudusaimi, N. Shiraki, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, “Performance evaluation of multiple human-body localization using bistatic MIMO radar,” 2019 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2019), IF-44, pp.663-665. Dec.2019.
- [7] K. Numazaki, N. Honma, N. Shiraki, T. Nakayama, and S. Iizuka, “Multiple human localization method using compressed sensing,” 2019 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2019), F3-3, pp.1606-1608, Dec.2019.
- [8] T. Hayashi, N. Honma, N. Shiraki, K. Numazaki, T. Nakayama, S. Iizuka, and K. Murata, “Non-constraint estimation method of human orientation using multi-static MIMO radar,” 2020 IEEE

International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, TU-UC.1A.1, Jul. 2020.

- [9] N. Shiraki, N. Honma, K. Murata, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Evaluation of target localization accuracy using MIMO-OFDM radar," 2020 International Symposium on Antennas and Propagation, 4G3-1, pp.843-844, Jan. 2021.
- [10] N. Honma, D. Sasakawa, N. Shiraki, K. Murata, T. Nakayama, and S. Iizuka, "A state-machine-based approach for human activity classification using MIMO radar," 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, FR-2-1, Oct. 2021.
- [11] T. Ito, T. Hayashi, N. Shiraki, N. Honma, A. Abudusaimi, K. Murata, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Calibrating living-body MIMO radar having miniaturised array with imperfect radiation patterns," 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, FR-3-5, Oct. 2021.

### 3. 研究会

- [1] 白木信之, 笹川大, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一, “複数受信局を用いた生体レーダ位置推定精度の向上法,” 第2回コミュニケーションクオリティ学生ワークショップ, Aug. 2017.
- [2] 岸本一真, 本間尚樹, 白木信之, 笹川大, “複数アンテナを用いた生体信号発生部位の評価,” 第2回コミュニケーションクオリティ学生ワークショップ, Aug. 2017.
- [3] 白木信之, 笹川大, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一, “複数局協調型 MIMO レーダを用いた生体位置推定精度の評価,” 信学技報, AP2018-54, pp. 73-78, Jul. 2018.
- [4] 白木信之, 笹川大, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一, “アレーアンテナを用いた生体向き推定法の評価,” 信学技報, AP2018-82, pp. 7-12, Sep. 2018.
- [5] 佐藤浩, 堀端研志, 白木信之, 本間尚樹, 高橋応明, 小柳芳雄, “近接配置した3素子モノポールアンテナの結合低減検討,” 信学技報, AP2018-73, pp.35-40, Aug. 2018.
- [6] A. Abudusaimi, N. Shiraki, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, “Localizing multiple human-bodies using unsynchronized bistatic MIMO radar,” 信学技報, AP2019-76, pp.37-42, Sep. 2019.
- [7] 沼崎和樹, 本間尚樹, 白木信之, 中山武司, 飯塚翔一, “バイスタティック MIMO レーダにおける MUSIC スペクトラムに基づいた人数推定法,” 信学技報, AP2019-105, pp.137-142, Oct. 2019.
- [8] 沼崎和樹, 本間尚樹, 白木信之, 中山武司, 飯塚翔一, “MIMO レーダにおけるスペクトラム処理に基づいた人数推定法,” 信学技報, AP2020-114, pp.61-66, Jan. 2021.
- [9] 白木信之, 本間尚樹, 村田健太郎, 中山武司, 飯塚翔一, “複数局協調型 MIMO レーダを用いた多人数測位精度評価,” 信学技報, AP2021-50, pp. 13-18, Aug. 2021.
- [10] 白木信之, 本間尚樹, 村田健太郎, 中山武司, 飯塚翔一, “チャンネル時間応答線形予測と生体移動速度を考慮した MIMO レーダの測位精度評価,” 信学技報, AP2021-65, pp. 47-52, Sep. 2021.
- [11] 林哲平, 本間尚樹, 白木信之, 村田健太郎, 中山武司, 飯塚翔一, “垂直アレー MIMO レーダを用いた生体認証法の評価,” 信学技報, AP2021-64, pp. 41-46, Sep. 2021.

## 4. 全国大会

- [1] 白木信之, 笹川大, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一. “複数受信局を用いた生体レーダ位置推定精度の向上法,” 電気情報通信学会総合大会, B-1-149, Mar. 2017.
- [2] 岸本一真, 米澤真也, 白木信之, 笹川大, 本間尚樹. “アレーアンテナを用いた生体信号発生部位の評価,” 電気情報通信学会総合大会, B-1-147, Mar. 2017.
- [3] 白木信之, 笹川大, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一. “複数受信局を用いた複数ターゲット位置推定の精度評価,” 信号処理シンポジウム, P-8, Nov. 2017.
- [4] 白木信之, 笹川大, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一. “複数局協調型 MIMO レーダを用いた複数生体位置推定精度の評価,” 電気情報通信学会総合大会, B-1-134, Mar. 2018.
- [5] 袁 之雄, 本間尚樹, 白木信之, 笹川 大, 中山武司, 飯塚翔一, “アレーアンテナを用いた生体向き推定法,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-132, Mar. 2018.
- [6] 白木信之, 笹川大, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一. “マイクロ波を用いた生体向き推定法の性能評価,” 電気関係学会東北支部連合大会, 2C05, Sep. 2018.
- [7] 白木信之, 笹川大, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一. “OFDM 信号を用いた MIMO レーダによる屋内生体方向推定法,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-140, Sep. 2018.
- [8] 沼崎和樹, 笹川大, 本間尚樹, 白木信之, 中山武司, 飯塚翔一, “圧縮センシングを用いた複数人数位置推定法,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-146, Mar. 2019.
- [9] 白木信之, 平栗健史, 伊達隆人, 設樂勇, 本間尚樹. “ドローンによる 3次元メッシュネットワークにおける指向性ビーム間干渉の理論解析,” 電子情報通信学会総合大会, BS-7-1, Mar. 2019.
- [10] 白木信之, 笹川大, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一. “MIMO-OFDM レーダを用いた生体位置推定精度の評価,” 電子情報通信学会総合大会, B-1-122, Mar. 2019.
- [11] 白木信之, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一, “MIMO-OFDM レーダを用いた生体位置推定精度の解析,” 電気関係学会東北支部連合大会, 2H05, Aug. 2019.



- [12] A. Abudusaimi, N. Shiraki, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Performance analysis of unsynchronized MIMO radar for human-body localization," 電気関係学会東北支部連合大会, 1105, Aug. 2019.
- [13] 白木信之, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一, "複数局協調型 MIMO レーダを用いた生体数推定法," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, CS-2-1, Sep. 2019.
- [14] 本間尚樹, 沼崎和樹, 白木信之, 中山武司, 飯塚翔一, "MIMO レーダ MUSIC スペクトルに基づく対象数推定法 (その 1) ~数値解析による性能評価~, " 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-128, Sep. 2019.
- [15] 沼崎和樹, 本間尚樹, 白木信之, 中山武司, 飯塚翔一, "MIMO レーダ MUSIC スペクトルに基づく対象数推定法 (その 2) ~屋内環境における実験的評価~, " 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-129, Sep. 2019.
- [16] A. Abudusaimi, N. Shiraki, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Localization Performance of Unsynchronized MIMO Radar with Multiple Human-bodies," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-85, Sep. 2019.
- [17] 白木信之, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一, 村田健太郎, "2次元重みづけ関数を用いたマルチスタティック MIMO レーダ," 電子情報通信学会総合大会, B-1-153, Mar. 2020.
- [18] 林哲平, 白木信之, 沼崎和樹, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一, 村田健太郎, "複数局 MIMO レーダを用いた非拘束生体向き推定法," 電子情報通信学会総合大会, B-1-150, Mar. 2020.
- [19] 白木信之, 本間尚樹, 村田健太郎, 中山武司, 飯塚翔一, "重みづけ固有ベクトルを用いた複数局生体位置推定法の精度評価," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-131, Sep.2020.
- [20] 沼崎和樹, 本間尚樹, 白木信之, 村田健太郎, 中山武司, 飯塚翔一, "MIMO レーダにおける雑音電力を用いた対象数推定法," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-128, Sep.2020.
- [21] 白木信之, 本間尚樹, 中山武司, 飯塚翔一, 村田健太郎, "チャンネル時間応答線形予測と移動速度を考慮した生体 MIMO レーダ測位精度の向上法," 電子情報通信学会総合大会, B-1-144, Mar. 2021.
- [22] 伊藤友則, 林哲平, 白木信之, 本間先生, 村田健太郎, 中山武司, 飯塚翔一, "既知座標チャンネル応答を用いた生体 MIMO レーダの校正法," 電子情報通信学会総合大会, B-1-139, Mar. 2021.
- [23] 白木信之, 本間尚樹, 村田健太郎, 中山武司, 飯塚翔一, "送受信局配置を考慮した複数協調型 MIMO レーダの測位精度評価," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-102, Sep.2021.

- [24] 林哲平, 本間尚樹, 白木信之, 村田健太郎, 中山武司, 飯塚翔一, “垂直アレー MIMO レーダを用いた生体認証法,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-121, Sep.2021.
- [25] A. Abudusaimi, N. Shiraki, N. Honma, K.Murata, T. Nakayama, and S. Iizuka, “Bistatic SIMO Radar Human-Body Localization Using Merged Roundtrip Channels,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-70, Sep.2021.

## 5. 表彰

- [1] 岸本一真, 本間尚樹, 白木信之, 笹川大, “複数アンテナを用いた生体信号発生部位の評価,” 第2回コミュニケーションクオリティ学生ワークショップ 優秀研究賞, Aug. 2017.
- [2] 白木信之, “電子情報通信学会東北支部,” 優秀学生表彰, Mar. 2018.
- [3] 白木信之, “ドローンによる3次元メッシュネットワークにおける指向性ビーム間干渉の理論解析,” 電子情報通信学会 インターネットアーキテクチャ若手ポスターセッション・プレゼンテーション賞, Mar. 2019.
- [4] 白木信之, “MIMO-OFDM レーダを用いた生体位置推定精度の評価,” 学術奨励賞, Mar. 2020.
- [5] N. Shiraki, T. Hiraguri, I. Shitara and N. Honma, “Theoretical analysis of interference between directional beams in drone-based 3D mesh network,” IEICE Communications Express Top download letter award, Apr.2020.

## 6. 特許

- [1] 飯塚翔一, 中山武司, 本間尚樹, 白木信之, “人数および生体位置推定装置,” 特願 2018-088490, 2018 年 5 月 2 日.
- [2] 飯塚 翔一, 中山武司, 本間尚樹, 笹川大, 白木信之, “生体方向および生体位置推定装置,” 特願 2018-126819, 2018 年 7 月 3 日.
- [3] 中山武司, 飯塚 翔一, 本間尚樹, 白木信之, アブドゥサイミ アブドゥアイニ “推定装置,” 特願 2018-247386, 2018 年 12 月 28 日.
- [4] 中山武司, 中山武司, 本間尚樹, 笹川大, 白木信之, 沼崎和樹, “推定装置,” 特願 2018-248250, 2018 年 12 月 28 日.
- [5] 飯塚 翔一, 中山武司, 本間尚樹, 白木信之, “推定装置,” 特願 2018-246741, 2018 年 12 月 28 日.
- [6] 飯塚 翔一, 中山武司, 本間尚樹, 沼崎和樹, 白木信之, “センサ,” 特願 2019-123359, 2019 年 7 月 2 日
- [7] 中山武司, 飯塚 翔一, 本間尚樹, 白木信之, 林哲平, 沼崎和樹, “推定装置または推定方法,” 特願 2020-000876, 2020 年 1 月 7 日
- [8] 飯塚 翔一, 中山武司, 本間尚樹, 白木信之, “センサおよび位置推定方法,” 特願 2020-000925, 2020 年 1 月 7 日
- [9] 飯塚翔一, 中山武司, 本間尚樹, 白木信之, “センサ,” 特願 2020-031770, 2020 年 2 月 27 日
- [10] 飯塚翔一, 中山武司, 本間尚樹, 村田健太郎, 沼崎和樹, 白木信之, “センサ,” 特願 2020-112997, 2020 年 6 月 30 日
- [11] 中山武司, 飯塚翔一, 本間尚樹, 伊藤友則, 林哲平, 白木信之, 村田健太郎, “センサ,” 特願 2020-217596, 2020 年 12 月 25 日
- [12] 中山武司, 飯塚翔一, 本間尚樹, 林哲平, 白木信之, “推定装置／生体識別装置,” 特願 2021-108195, 2021 年 6 月 29 日

- [13] 中山武司, 飯塚翔一, 本間尚樹, アブドゥサイミ アブドゥアイニ, 白木信之, “推定方法／生体位置推定装置,” 特願 2021-108202, 2021 年 6 月 29 日