

多素子アンテナ空間信号処理技術と融合した無線センシング技術の調査研究

研究代表者

牟田 修

九州大学 大学院システム情報科学研究所 教授

1 はじめに

第5世代移動通信システム（5G）の高度化（5G evolution）および第6世代移動通信システム（6G）に向けた技術検討が世界各国で本格化している。なかでも、無線信号やAI技術を活用して物体検知・行動認識を実現する無線センシング技術は、6Gにおいて期待される多様なユースケースを支える重要な要素技術の一つとして注目されている[1]。

無線通信信号を活用したセンシングでは、アンテナ素子数の増加やアンテナの空間配置構成の最適化が性能向上の鍵を握る。特に、多素子 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 通信方式では、CSI (Channel State Information) や RSS (Received Signal Strength) に関する空間的・周波数的な観測情報を多数取得可能となるため、無線信号を活用した位置推定や物体検知などの無線センシング性能の向上が期待されている。無線センシングは、対象が無線デバイスを持たないデバイスフリー型と、対象が無線端末を有することを前提としたデバイススペース型に大別される。例えば、CSI を利用した物体検知や行動認識はデバイスフリー型無線センシングの代表例であり[2]、一方、RSS 等を利用した測位および位置推定技術はデバイススペース型の手法として広く検討されている[3]。

また、近年では、アンテナを基地局へ集中配置するだけでなく、面的に分散配置する分散 MIMO 構成や、近傍端末同士が高速無線通信を介して観測情報を共有し、相互に協調動作する端末連携型無線システムについても検討が進められている。これにより、各端末が取得した CSI や RSS 等の無線信号情報を統合的に利用可能となり、疎な基地局配置環境や複雑な屋内伝搬環境においても、位置推定や物体検知性能の向上が期待されている。さらに、端末間連携により仮想的な大規模 MIMO 成を形成することで、通信性能とセンシング性能の双方を向上させることが期待されている。しかしながら、無線通信および無線センシングの性能は、アンテナ素子数だけでなく、アンテナ配置や周辺の伝搬環境にも大きく依存する。特に反射波や遮蔽の影響により CSI や RSS の空間分布が複雑に変動する屋内環境等におけるアンテナ配置法やその制御手法は未だ十分に確立されていない。

本研究では、無線通信とセンシングの性能向上を両立する無線システムの実現を目的とし、無線信号を活用した物体検知および端末間連携による位置推定を対象として、多素子 MIMO システムにおけるアンテナ配置法、端末協調技術、および伝搬環境を考慮した空間信号処理・制御手法について調査研究を行う。

2 端末連携 MIMO 技術を用いる無線センシング技術の検討

近傍端末が高速無線通信を介して互いに協調することで仮想的な MIMO を形成する端末連携技術が注目されている。このような端末協調型 MIMO 構成では、通信容量の向上だけでなく無線センシングや位置推定精度の向上も期待できる。近年の無線端末では従来の sub-6 GHz 帯に加えて高周波数帯を利用した高速端末間通信が利用可能であり、これを端末間情報共有に活用することで端末連携をおこなう手法が検討されている[4][5]。この端末連携技術を測位に応用することで、高精度な協調型位置推定技術の実現が期待されている。本研究では、高周波数帯を利用した端末間直接通信により、RSS や位置情報を共有する端末協調型無線システムを対象とし、端末連携による位置推定技術の高度化について検討を行った。

2-1 端末連携 MIMO 技術を用いる平面位置推定技術

(1) 背景

本論文では、屋内における端末測位精度の向上を実現する技術として、高周波数帯における端末連携に基づく位置推定技術を提案し、種々の検討シナリオにおける達成可能な位置推定精度を計算機シミュレーションにより評価する。高周波数帯の通信回線を介して近隣端末間で互いの受信電力強度 (RSS: Received signal strength) 情報を共有することで測位精度を向上する端末連携位置推定アルゴリズムを示す。具体的には、端末連携位置推定を各ネットワークノード（基地局および端末）における位置推定値の二乗誤差の和を最小

化する最適化問題として定式化し、それを反復的に解くアルゴリズムを示す。第2に、連携可能な端末数が測位精度に与える影響を計算機シミュレーションにより評価し、その有効性を示す。

(2) 端末連携位置推定技術の原理

図 1-1 に端末連携位置推定の原理を示す。3 つ以上のアクセスポイント (AP) と端末間の受信強度情報 (RSS) を利用することで、AP-端末間の距離情報から端末の位置座標 (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) を推定する。このとき、端末間距離は $D = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}$ から求めることができる。検討方式では、端末間の直接通信時の受信電力強度 (RSS) から端末間距離 $\hat{D}$ を推定し、 $|D - \hat{D}|^2$ の最小化する端末位置を求めることで、端末間連携のない場合に比べて、位置推定精度を高めることができる。

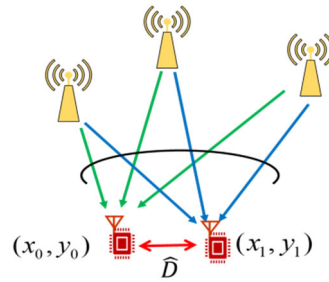


図 1-1 連携位置推定の原理

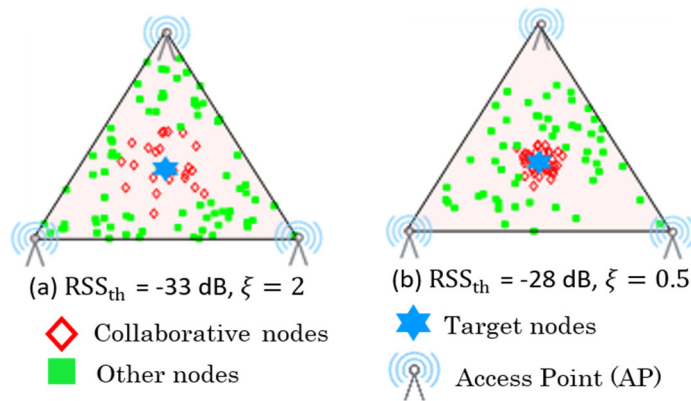


図 1-2 シミュレーションのセットアップ。

(3) システムモデル

システム構成を図 1-2 に示す。複数の基地局 (BS: Base Station) およびユーザ端末 (UE: User Equipment) から構成され、各 UE は二つの無線インタフェースを有すると仮定する。一つは sub-6 GHz 帯を利用する基地局-端末間 (B2U: BS-to-UE) 通信リンク用であり、もう一つは高周波数帯を利用した端末間協調通信用である。図中では、青色六角形を位置推定対象端末、赤色菱形を協調端末としている。また、RSS (Received Signal Strength) が低い場合協調通信が不可能な端末を緑色四角形で示している。サービスエリア内のすべての端末は基地局からの信号を受信し、位置が既知である基地局間では情報共有が可能である。端末間の受信信号強度が所定閾値を超える場合には、端末間で協調リンクを形成可能とする。これにより、各端末は接続された基地局および協調端末から取得した情報を用いて自己位置推定を行う。図 1-2(a)および図 1-2(b)におけるユーザ分布の違いは $f(d) = \frac{\xi d^{\xi-1}}{C R^{\xi}}$ 、で与えられる。 C は定数、 d はユーザ端末からセル幾何中心までの距離を表す。 $\xi = 2$ の場合は一様分布、 ξ が 0 に近づくほど、図に示すように中心付近へ集中したユーザ分

布となる。距離減衰式は $PL(d) = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi f_c}{c}\right) + 10\alpha\log_{10}(d)$ for $d > 1\text{ m}$ により与えられる。 f_c は搬送波周波数、 c は光速、 α はパス損失指数を表す。距離推定値は $\hat{d}_{i,j} = 10^{\frac{Z_{i,j}(\alpha)}{10\alpha}}$ 、で与えられる。ここで、 $Z_{i,j}(\alpha)$ はノード j からノード i において観測される RSS を表す。

各ユーザ端末 (UE) は、基地局 (BS) から受信した RSS 測定値を用いて自身の位置を推定する。UE i の位置座標を $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i]^T$ 、and letting S_i denote the set of BS の既知の位置を $\mathbf{p}_j$ 、BS 位置の集合を S_i とすると、ユークリッド距離の二乗は $\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|^2 = \|\mathbf{p}_i\|^2 - 2\mathbf{p}_j^T \mathbf{p}_i + \|\mathbf{p}_j\|^2$ と表される。これを RSS から得られる測定距離の二乗 $\hat{d}_{i,j}^2$ と等しいとおくと、 $\|\mathbf{p}_i\|^2 - 2\mathbf{p}_j^T \mathbf{p}_i = \hat{d}_{i,j}^2 - \|\mathbf{p}_j\|^2$ が得られる。ここで、 $\boldsymbol{\theta}_i = [x_i, y_i, \|\mathbf{p}_i\|^2]^T$ と定義すると、 $j \in S_i$ に対して次式のように表される。

$$\mathbf{a}_j \boldsymbol{\theta}_i = b_j,$$

ここで、 $\mathbf{a}_j = [-2x_j \quad -2y_j \quad 1]$ 、 $b_j = \hat{d}_{i,j}^2 - \|\mathbf{p}_j\|^2$ である。これらの連立方程式の最小二乗解を求め、そこから推定位置 $\hat{\mathbf{p}}_i$ を求めることができる。

(4) 端末間連携技術を用いる協調型位置推定技術

図 1-1 に示すように、端末間連携回線における RSS 値から端末間の距離推定値 $\hat{D}$ が求まる。協調型位置推定の基本的な考え方は AP 信号から推定された位置を端末間連携リンクから得られる距離推定値との二乗誤差和が最小となるように補正することである [6]。したがって、協調型位置推定問題は以下のコスト関数を最小化する問題として定式化される。

$$C(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j \in S_i} w_j (\hat{d}_{i,j} - \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|)^2, \quad (1.5-1)$$

ここで、 w_j は信頼度に応じた重み係数であり、 $\mathbf{r}$ は全 UE の位置集合を表す。最急降下法 (iterative steepest descent method) を用いると、位置推定値は次式により更新される

$$\mathbf{p}_i^{(l)} = \mathbf{p}_i^{(l-1)} + \delta_i^{(l)} \sum_{j \in S_i} w_j (\hat{d}_{i,j} - \|\mathbf{p}_i^{(l-1)} - \mathbf{p}_j^{(l-1)}\|) \frac{\mathbf{p}_i^{(l-1)} - \mathbf{p}_j^{(l-1)}}{\|\mathbf{p}_i^{(l-1)} - \mathbf{p}_j^{(l-1)}\|}, \quad (1.5-2)$$

ここで、 $\delta_i^{(l)}$ は反復回数 l におけるステップサイズを表す。

提案方式の有効性を評価するためシミュレーション評価を実施した。対象領域内に 3 基地局 (BS) および 50 ユーザ端末 (UE) が存在するライスフェージング環境を仮定した。基地局間距離は 200 m とし、UE は基地局によって形成される三角形領域内へ配置した。また、64 サブキャリアを用いる OFDM 伝送を仮定した。ライス係数は、基地局一端間リンクおよび端末間協調リンクに対して、それぞれ 7 dB および 15 dB に設定した。さらに、UE は静止しているものと仮定した。基地局送信電力は 30 dBm、端末間協調リンクの送信電力は 20 dBm とした。雑音電力スペクトル密度は -174 dBm/Hz とした。

図 3 に、ユーザ集中度パラメータ ξ および協調リンク RSS 閾値が位置推定誤差へ与える影響を示す。ここで、結果は統計モデルにより取得したものである。具体的には、 ξ を 0 に近い値 (ユーザが中心付近へ集中した分布) から $\xi=2$ (一様分布) まで変化した場合の位置推定誤差の累積分布関数 (CDF: Cumulative Distribution Function) を示している。評価結果より、ユーザ分布が集中する場合 (小さい ξ) には、端末間協調リンク数が増加するため、位置推定誤差が低減される傾向を確認した。また、RSS 閾値を低く設定した場合には、接続可能な協調リンク数が増加するため、位置推定性能が向上することを確認した。

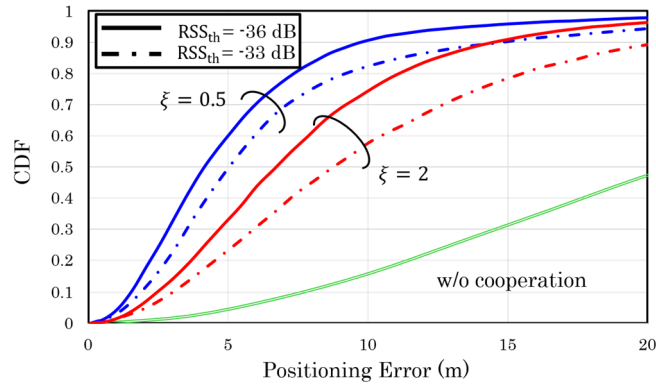


図 1-3 ユーザ密集度パラメータ ξ を変化させた場合の測位誤差の累積分布関数

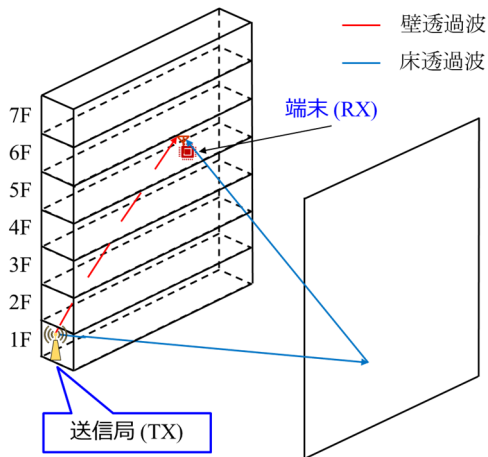
2-2 端末連携 MIMO を用いる多層建物の階高推定技術

(1) 多層建物内の電波伝搬モデルの構築と評価

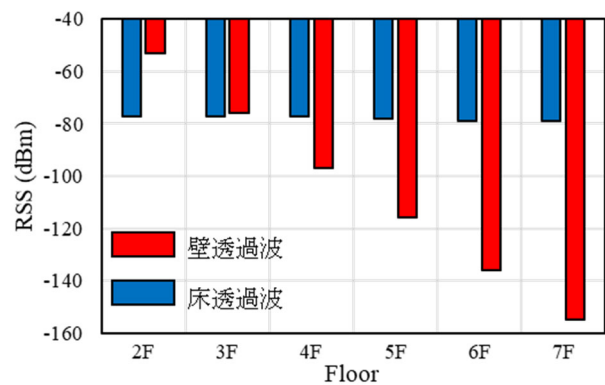
[背景]

多層建物の建設現場や大型施設内では、無線測位技術を用いた作業従事者や機材等の位置推定技術の実現が期待されている[7]。一方、多層建物環境では、壁や床による遮蔽・透過の影響により無線信号の受信電力(RSSI)が複雑に変動するため、位置推定精度が大きく劣化することが課題となる[8][9]。したがって、多層建物内における高精度な位置推定や階高推定を実現するためには、建物内部の電波伝搬特性を適切にモデル化することが重要である。

従来、建物内部の電波伝搬モデルでは、送信局から各階へ伝搬する「床透過波」を中心としたモデル化が広く用いられてきた。しかしながら、多層建物では、建物外壁や周辺構造物で反射した電波が窓や開口部を介して建物内部へ到達する「壁透過波」の影響も無視できない。特に、上層階になるほど床透過損失が増大するため、壁透過波の影響が支配的となる可能性がある。このような伝搬特性を考慮しない場合、階毎の RSSI 分布を適切に表現できず、階高推定精度が低下する可能性がある。



(a) 2 波モデルの概念図



(b) 各階(2 階以上)の平均 RSSI

図 2-1: 提案モデルの概念図および RSSI の比較

[提案モデル]

本研究では、多層建物内における無線伝搬特性を表現するため、床透過波に加えて、外壁や周辺構造物による反射波を考慮した電波伝搬モデルを提案した。提案モデルでは、送信局から直接上層階へ到達する床透過波と、建物外部で反射した後に窓や開口部を介して建物内部へ到達する壁透過波の双方を考慮する。図 2-1(a)に提案モデルの概念図を示す。

また、提案モデルの基本特性を確認するため、幅 2 m、長さ 30 m、階高 2.6 m の 7 階建てコンクリート構造物を対象としたレイトレース法による簡易モデルを構築した。建物近傍には隣接建物を想定し、送信機は

1 階隅部へ配置した。図 2-1 (b) には、各階における床透過波および壁透過波の平均 RSSI を示している。評価結果より、送信局から階数が離れるに従い、床透過波よりも壁透過波の影響が支配的となる傾向を確認した。

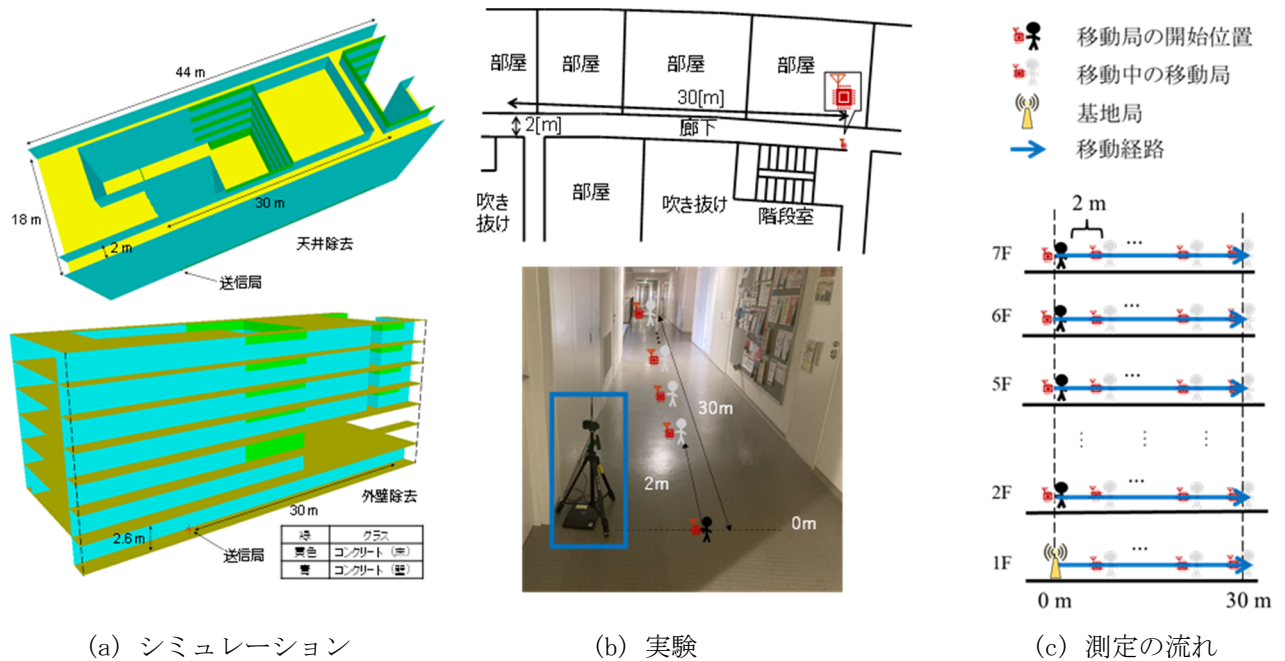


図 2-2: 評価シナリオ

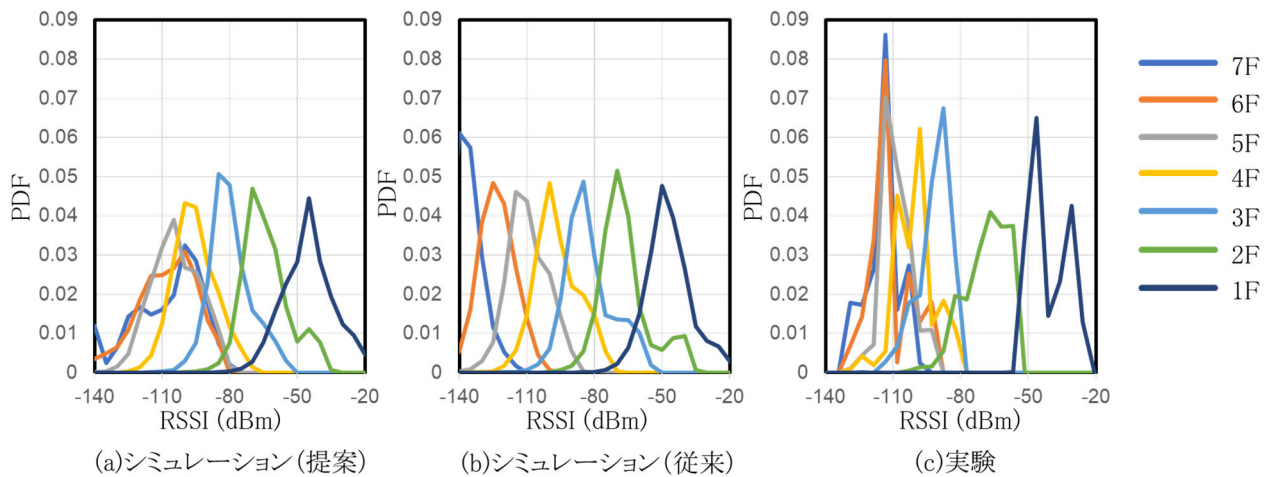


図 2-3: 多層建物内の RSSI 分布

[評価シナリオと評価結果]

提案モデルの妥当性を評価するため、レイトラシングによるシミュレーションおよび実機実験を実施した。図 2-2 (a) にシミュレーションシナリオ、図 2-2 (b) に実験環境を示す。評価では、周波数 920.7 MHz、帯域幅 250 kHz、拡散率 7、送信電力 13 dBm の LoRa 信号を用いた。送信局は 1 階に設置し、各階に測定点を配置した。測定領域は幅 2 m、長さ 30 m、高さ 1 m とした。実験では図 2-2 (c) で示したように、各階に LoRa 端末を配置し、2 秒ごとにテスト信号を送信した。対象端末は廊下に沿って 30 m 移動し、2 m ごとに停止して RSSI を測定した。これにより、各階における RSSI 分布特性を取得し、提案モデルとの比較評価を行った。

図 2-3 に、シミュレーションおよび実験により得られた多層建物内の RSSI 分布を示す。図 2-3 (a) は提案モデル、図 2-3 (b) は床透過波のみを考慮した従来モデル、図 2-3 (c) は実験結果を示している。従来モデルでは、送信局から階数が離れるにつれて RSSI が単調に減衰する傾向がみられる。一方、提案モデルでは、上層

階になるほど壁透過波の影響が増加し、RSSI 分布が従来モデルとは異なる傾向を示すことを確認した。特に4階以上では、壁透過波の影響が支配的となり、階毎のRSSI分布の差異が小さくなる傾向が確認された。また、提案モデルによるRSSI分布は、実験結果と良好に一致することを確認した。これにより、多層建物環境では、床透過波だけでなく壁透過波を考慮した伝搬モデルが必要であることを明らかにした。

以上より、多層建物における高精度な階高推定や屋内位置推定を実現するためには、建物外部からの反射波を含む複雑な伝搬特性を考慮したモデル化が重要であることを確認した。また、本研究で提案した伝搬モデルは、将来の端末連携型屋内測位システムや協調型無線センシング技術の設計に有効であると考えられる。

(2) 端末連携を利用した階高推定技術の検討

多層建物環境における位置推定技術は、IoT 端末や作業従事者の位置把握を実現するための重要技術として注目されている[10]。特に、建設現場や災害現場等の環境では、アクセスポイント (AP) の高密度配置が困難であるため、少数の AP のみを利用して高精度な階高推定を実現することが求められる。一般に、RSS (Received Signal Strength) を利用した位置推定方式は、専用測距装置や厳密な同期機構を必要としないため、低コストかつ容易に導入可能な方式として期待されている。しかしながら、多層建物環境では、床透過波だけでなく壁透過波や反射波の影響により、各階で観測される RSS 分布が類似する場合があります。AP から観測される RSS 情報のみでは階高 (フロアレベル) を識別できないという課題がある。ところで、近傍端末間で観測情報を共有する端末連携型 MIMO 技術が注目されている。このような端末連携型 MIMO 構成では、空間的に分散配置された複数の観測点の情報を利用可能となることで、空間ダイバーシチ効果を利用した位置推定性能の向上が期待できる。

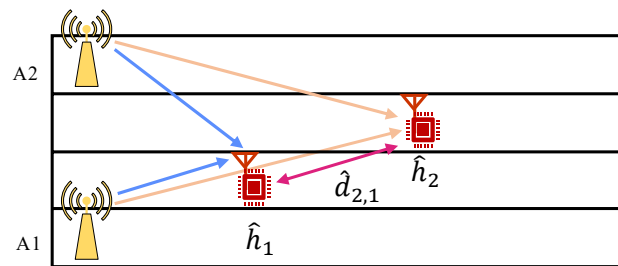


図 2-4: 階高推定のシステムモデル

本検討では、端末間連携を利用した協調型階高推定方式を提案する。図 2-4 にシステムモデルを示す。各端末は、AP (Access Point) から取得した RSS 情報に加え、近傍端末間で共有される RSS 情報を利用することで、端末間の相対的な階差情報を推定し、複数端末が協調的に階高推定を行う。本方式では、多層建物における階毎の RSS 分布が、床透過波 (FT: Floor-Transmitted) 成分および壁透過波 (WT: Wall-Transmitted) 成分により支配されることに着目した。

図 2-5 に、端末間 RSS と階差との関係を示す。図 2-5 では、端末間 RSS が階差に応じて段階的に変化する特性を、シグモイド関数を用いて滑らかに近似している。この近似により、RSS 観測値から端末間の相対的な階差情報を連続値として推定できるため、数値最適化に適した協調型階高推定モデルを構築可能となる。これにより、前節で示した RSS ベース協調型位置推定と同様に、端末間 RSS から得られる相対情報を利用した協調型推定問題として階高推定問題を定式化できる。具体的には、前節の平面位置推定では端末間距離情報を利用していたのに対し、本研究では端末間 RSS から推定される階差情報を利用することで、多層建物環境における協調型階高推定を実現した。さらに、本検討では、同一の協調観測モデルに基づき、最小二乗法 (LS: Least Squares) およびベイズ推定に基づく階高推定方式を構築した。LS 方式では、端末間 RSS から推定される階差情報との誤差を最小化することで階高推定を行う。一方、ベイズ推定方式では、RSS 観測誤差の不確かさを考慮した確率モデルを利用することで、より安定した階高推定を実現する。

レイトレーシングモデルを用いたシミュレーション評価を実施した。図 2-6 に評価環境を示す。評価では、多層建物内に少数の AP を配置し、複数端末が各階へ分散配置される環境を想定した。AP 周波数は 920MHz 帯、端末間協調リンクには 28GHz 帯を利用した。また、床透過波および壁透過波を考慮した簡易伝搬モデルを用いて評価を行った。

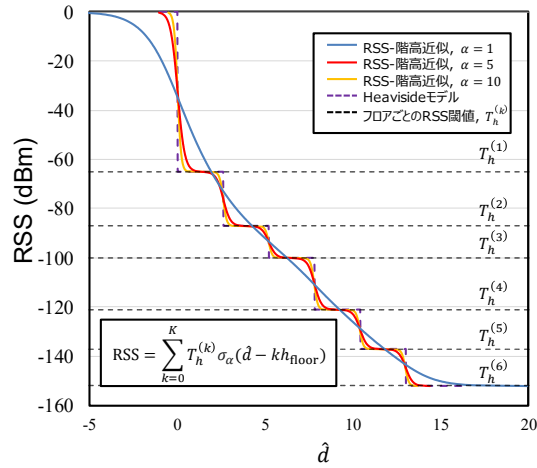


図 2-5: 端末間 RSS に対する階差のメトリック

図 2-7 に階高推定結果を示す。評価結果より、AP のみを利用する非協調型方式では、中間階において階識別性能が大きく低下する傾向を確認した。これは、中間階では上下階からの伝搬波の影響が重畳するため、RSS 分布が類似しやすいためである。一方、端末間連携を利用した協調型方式では、近傍端末間の RSS 情報を利用することで、階差情報に基づく補完的な観測が可能となり、中間階を含めて階高推定性能が改善されることを確認した。また、ベイズ推定方式[11]は、RSS 観測誤差を確率的に扱うことで、最小二乗法に基づく方式よりも安定した階高推定性能を実現可能であることを確認した。一方、LS 方式は計算量が比較的小さいため、低複雑度な階高推定方式として有効であることを確認した。

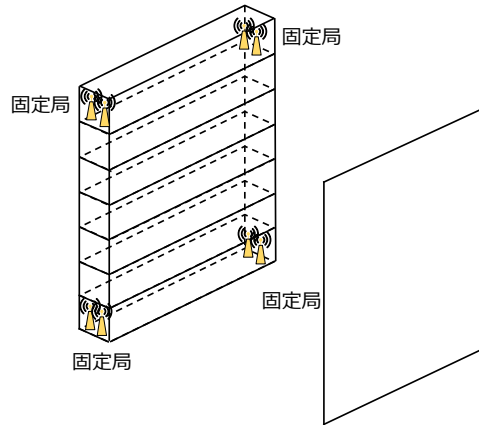


図 2-6: 評価のシナリオ

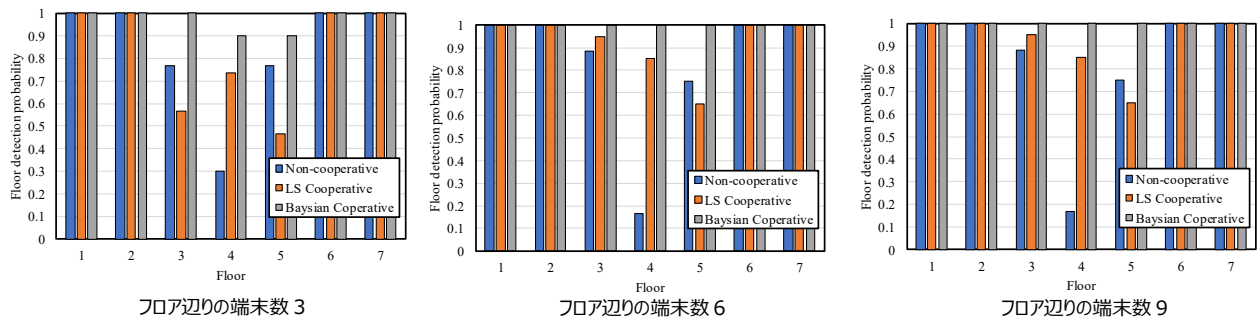


図 2-7: 階高推定の評価結果

各階に存在する端末数を増加させることで、端末間連携による空間ダイバーシチ効果が向上し、階識別性能をさらに改善可能であることを確認した。これにより、端末連携型 MIMO 構成を利用することで、疎アンカー環境においても高精度な階高推定を実現可能であることを示した。

3 MIMO 伝搬チャネル情報 (CSI) を用いる無線センシング高度化の検討

3-1 背景

第 6 世代移動通信システム (6G) に向けた要素技術として、通信とセンシングを統合的に実現する ISAC (Integrated Sensing and Communication) が注目されている[1]。それに伴い、既存の無線通信インフラを利用して周辺環境を推定する無線センシング技術に関する研究が活発化している。特に、無線通信回線における伝搬チャネル状態情報 (CSI: Channel State Information) を利用したデバイスフリー型物体検知技術が注目されている。

CSI を用いる無線センシングでは、アクセスポイント (AP) と端末 (STA) 間の無線伝搬特性を観測し、その変動を機械学習等により解析することで、対象物の存在や位置、行動等を推定する。また、MIMO (Multi-Input Multi-Output) 伝送と OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を組み合わせた MIMO-OFDM を用いる場合、空間領域および周波数領域における大量の CSI 情報を同時に取得可能である。そのため、人物移動や物体存在に伴う伝搬路変動を詳細に観測可能となり、無線信号を利用した位置推定や物体検知への応用が期待されている。従来、IEEE802.11ac 等の無線 LAN システムにおける CSI フィードバックフレームを収集・解析し、機械学習の特徴量として利用することで、対象物体の位置や状態等を推定するデバイスフリー型物体検知方式が検討されている[12]–[15]。しかしながら、CSI を用いた物体検知技術の特性は、アンテナ配置や周辺の伝搬環境に大きく依存することが知られている。そのため、電波伝搬特性やアンテナ配置が物体検知精度へ与える影響を考慮したシステム設計が求められる。従来、デバイスフリー物体検知方式の屋内環境における有効性が実験的に示されているが、広域屋内環境や反射物の少ない環境における検知特性、およびアンテナ配置やアンテナ素子数が物体検知特性へ与える影響については十分な評価がなされていない。

本節では、無線 LAN の CSI を利用した物体検知方式において、アンテナ配置やアンテナ素子数が物体検知精度へ与える影響を実験的に評価した。具体的には、IEEE802.11ac 無線 LAN の CSI を特徴量として用い、種々のアンテナ配置およびアンテナ素子数を適用した場合の屋内物体位置検知特性について比較評価を行った。さらに、広域屋内環境および屋外環境を対象とした実験評価を通じて、AP および STA の配置構成が物体検知性能へ与える影響について検討を行った。

3-2 CSI を用いるデバイスフリー物体検知技術

図 3-1 に、アクセスポイント (AP)、端末 (STA)、および CSI 収集端末から構成されるデバイスフリー型無線 LAN 位置推定システムの原理を示す。ここで、M、N、S はそれぞれ送信アンテナ数、受信アンテナ数、およびストリーム数を表す。観測領域内には単一の対象人物が存在するものとする。

デバイスフリー型位置推定の基本原理は、対象物体の存在や行動によって生じる無線チャネル変動を利用し、対象物体の状態を推定することである。図 3-1 に示すように、対象物体の移動や存在によって CSI が変動するため、対象物体の状態と無線チャネル状態との関係を機械学習によって学習することで、対象物体が無線端末を保持しない場合であっても位置推定を実現可能である。検知領域内における CSI 情報を取得する方法として、本研究では IEEE802.11ac 準拠の無線 LAN システムを利用した。STA 側では、チャネル推定後にチャネル行列の特異値分解 (SVD: Singular Value Decomposition) を実施し、右特異行列を圧縮したビームフォーミング重み (BFW: Beamforming Weight) を AP 側へフィードバックする構成とした。CSI 収集端末では、STA から送信される CSI フィードバックフレームを収集し、機械学習の特徴量として利用する。

図 3-2 に CSI 収集端末の構成を示す。本研究では、比較的小規模なデータセットでも高い位置推定性能を実現するため、現在および過去に取得した複数の BFW を時間方向に連結した系列化 CSI を利用した。複数の BFW を連結した特徴量を構成することで、対象物体の移動に伴う時間的変動を特徴量として利用可能となる。生成された特徴量は、オフライン学習およびオンライン検知の双方に利用される。

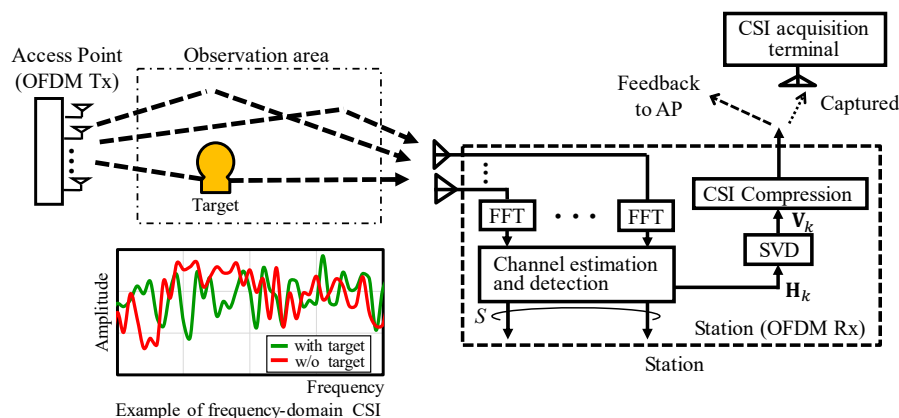


図 3-1 WLAN を用いたデバイスフリー位置推定における CSI 取得原理

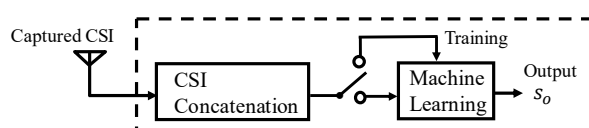


図 3-2 CSI 取得用端末の構成ブロック図

3-3 実験シナリオと評価結果

提案方式の有効性を種々の環境において評価するため、IEEE802.11ac 準拠の無線 LAN システムを用いた実験評価を実施した。反射物が比較的少ない代表的な環境として、屋外環境および大学構内の体育館を対象とした大規模屋内環境において実験を行った。図中の赤色破線で囲まれた領域を観測領域とし、その内部に存在する人物の位置推定性能を評価した。

本検討では、観測領域を $Q=20$ の領域へ分割し、各領域番号をラベルとする多クラス分類問題として位置推定を行った。AP は 4 本のアンテナを有し、同軸ケーブルを介して接続される構成とした。また、STA は三脚上に設置した。CSI フィードバックフレームは CSI 収集端末において取得し、機械学習モデルの学習データとして利用した。機械学習モデルとしては Random Forest を使い、実測 CSI を用いたオフライン学習により検知モデルを構築した。評価指標としては、対象人物が存在する実際の領域番号と、機械学習モデルによって推定された領域番号が一致する条件付き確率として定義される検知率を用いた。

図 3-3 に、異なる STA 配置を用いた屋外環境における領域別平均検知率（ヒートマップ）を示す。ここで、緑色の円は AP アンテナ位置、青色の円は STA 位置を表している。また、ヒートマップの色強度は各領域における検知率を示している。評価結果より、AP アンテナおよび STA が対向する領域では比較的高い検知率が得られる一方、それ以外の領域では検知率が低下する傾向が確認された。この結果から、AP アンテナおよび STA の配置を適切に設計することで、特定領域における検知性能を向上可能であることを確認した。

図 3-4(a)、(b)に、大規模屋内環境（体育館）における領域別平均検知率を示す。評価結果より、大規模屋内環境においても屋外環境と同様に、AP および STA が対向する領域において高い検知率が得られる傾向が確認された。また、図 3-4(b)では、AP および STA によって囲まれるカバレッジ領域と、それ以外の領域における平均検知率を比較している。その結果、AP および STA により十分に観測可能な領域では、その他の領域よりも高い検知率が得られることを確認した。

これらの結果より、CSI を利用したデバイスフリー型位置推定では、AP および STA の配置構成が位置推定性能へ大きく影響することを確認した。特に、AP アンテナおよび STA を適切に配置し、観測領域に対する空間カバレッジを向上させることで、広域屋内環境や反射物の少ない環境においても高い位置推定性能を実現可能であることを明らかにした。

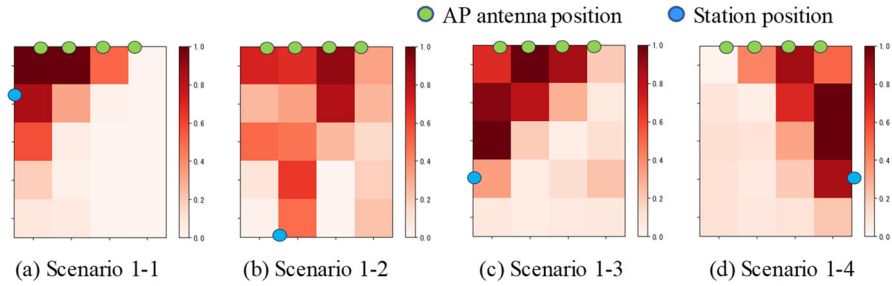


図 3-3 屋外実験シナリオにおける STA 位置ごとのエリア別検出確率（ヒートマップ）

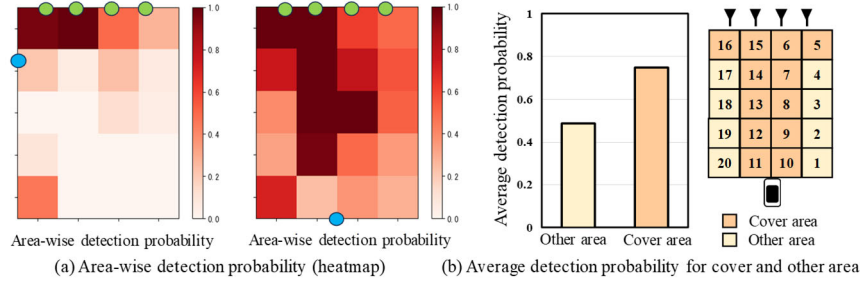


図 3-4 広域屋内環境における平均検出率

本検討では、CSI を利用したデバイスフリー型位置推定方式について、アンテナ配置および伝搬環境が検知性能へ与える影響を実験的に評価した。また、屋外環境および大規模屋内環境における実験評価結果より、AP および STA の配置構成が位置推定性能へ大きく影響することを確認した。特に、AP および STA を適切に分散配置することで、観測領域に対する空間カバレッジを向上可能であり、反射物の少ない環境においても検知性能を向上できることを示した。

4 まとめ

本調査研究では、MIMO 通信システムおよび端末連携型の仮想的な MIMO 無線システムを対象として、無線センシングおよび位置推定性能の向上に関する検討を行った。端末連携型 MIMO 技術に関する検討では、高周波数帯を利用した端末間協調通信により、RSS 情報を共有する協調型位置推定方式を提案した。平面位置推定および多層建物における階高推定を対象として評価を行い、端末間連携により空間ダイバーシチ効果を獲得することで、疎アンカー環境においても位置推定性能を改善可能であることを示した。また、多層建物環境では、床透過波および壁透過波を考慮した伝搬モデルを導入することで、より高精度な階高推定を実現可能であることを確認した。CSI を利用するデバイスフリー型物体検知方式について検討を行った。屋外環境および広域屋内環境における実験評価より、AP および STA の配置構成が物体検知性能へ大きく影響することを確認した。また、アンテナを適切に分散配置することで、広域環境や反射物の少ない環境においても検知性能を向上可能であることを示した。

参考文献：

- [1] “White Paper 5G Evolution and 6G (Version 5),” NTT DOCOMO, Inc., Jan. 2023.
- [2] A. Behravan, V. Yajnanarayana, M.F. Keskin, H. Chen, D. Shrestha, T.E. Abrudan, T. Svensson, K. Schindhelm, A. Wolfgang, S. Lindberg, and H. Wymeersch, “Positioning and sensing in 6G gaps, challenges, and opportunities,” IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 18, no. 1, pp. 40–48, Jan. 2023.
- [3] K. Lam, C. Cheung and W. Lee, “RSSI-Based LoRa Localization Systems for Large-Scale Indoor and Outdoor Environments,” in IEEE Trans. Veh. Technol., Dec. 2019.
- [4] H. Taromaru, H. Murata, T. Nakahira, D. Murayama, and T. Moriyama, “Error control on mobile

- station sides in collaborative multiple-input multiple-output systems,” IEEE Access, 2022.
- [5] L. -S. Tsai, S. -L. Shih, P. -K. Liao and C. -K. Wen, “MIMO Evolution Toward 6G: End-User-Centric Collaborative MIMO,” in IEEE Communications Magazine, vol. 62, no. 7, pp. 104-110, July 2024.
- [6] H. Wymeersch, J. Lien and M. Z. Win, “Cooperative Localization in Wireless Networks,” in Proceedings of the IEEE, 2009.
- [7] Y. Li, Z. He, Y. Li, H. Xu, L. Pei, Y. Zhang, “Towards Location Enhanced IoT: Characterization of LoRa Signal For Wide Area Localization,” Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services, Mar. 2018.
- [8] A. Sulaiman and M. Hussein, “A modified multi-wall wave propagation model for concrete based building structure,” Int. Conf. Comput. Commun. Eng., Jul. 2012.
- [9] H. Chen, J. Yang, Z. Hao, T. Qi, T. Liu, “Research on indoor multi-floor positioning method based on LoRa,” Computer Networks, vol. 254, pp. 110838, 2024.
- [10] A. Khalajmehrabadi, N. Gatsis, and D. Akopian, “Modern WLAN fingerprinting indoor positioning methods and deployment challenges,” in IEEE Commun. Surveys Tuts., 2017.
- [11] P. -A. Oikonomou-Filandras and K. -K. Wong, “HEVA: cooperative localization using a combined non-parametric belief propagation and variational message passing approach,” in Journal of Communications and Networks, vol. 18, no. 3, pp. 397-410, June 2016.
- [12] T. Murakami, M. Miyazaki, M. Ishida, and A. Fukuda, “Wireless LAN Based CSI Monitoring System for Object Detection,” MDPI Electronics, Nov. 2018
- [13] O. Muta, K. Takata, K. Noguchi, T. Murakami, and S. Otsuki, “Device-Free WLAN Based Indoor Localization Scheme with Spatially Concatenated CSI and Distributed Antennas,” IEEE Trans. Vehicular Technology, vol. 72, no. 1, pp. 852-865, Jan. 2023.
- [14] O. Muta, K. Noguchi, J. Izumi, S. Shimizu, T. Murakami, and S. Ohtsuki, “Device-free Indoor WLAN Localization with Distributed Antenna Placement Optimization and Spatially Localized Regression,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 23, issue 8, pp. 9869-9883, Aug. 2024.
- [15] O. Muta, J. Izumi, S. Shimizu, T. Murakami, and S. Otsuki, “Experimental Evaluation of Device-free Indoor Localization Using Channel State Information in WLAN Systems with Distributed Antennas,” IEICE Trans. Commun., vol. E107-B, no. 12, pp. 890-898, Dec. 2024.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Performance of RSS-Guided Terminal Selection for Enhanced User-Cooperative Indoor Positioning	International Japan-Africa Conference on Electronics、Communications、and Computations (JAC-ECC) 2025	2025 年 12 月
A Two-Component Propagation Model for Multi-Floor Buildings Incorporating Floor-Transmitted and Wall-Reflected Paths	International Japan-Africa Conference on Electronics、Communications、and Computations (JAC-ECC) 2025	2025 年 12 月
Evaluation and Experimental Comparison of WLAN-based Device-Free Localization Using Distributed Antennas	International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) 2025	2025 年 10 月
The Effect of Collaborative User Terminal Selection on RSS-Based Cooperative Positioning	IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2025	2025 年 9 月