

# アンテナ設置角による RSSI および位相値の一意性を用いた RF タグの位置推定手法の提案

三輪 悠季奈<sup>1,a)</sup> 水野 虹太<sup>1,b)</sup> 内藤 克浩<sup>2,c)</sup> 江原 正規<sup>3,d)</sup>

## 概要：

産業界において、Radio Frequency Identification (RFID) の利用が拡大している。主に無人レジや在庫管理等に導入されており、RF タグの移動追跡技術や位置推定技術によりサービスが実現されている。既存技術では、Received Signal Strength Indicator (RSSI) を元に機械学習での推定を行う。しかし、RSSI は周囲環境の影響を受けやすいため、RSSI 単体では安定した位置推定が困難である。

本論文では、RF タグの RSSI と位相値を用いた位置推定手法を提案する。2 種のパラメータを組み合わせることにより、位置推定の精度向上を図る。また、アンテナ 2 枚を傾けて設置することにより、電波環境の歪みを生成する。アンテナを正面に向けて設置した場合、通信範囲内の電波環境は左右対象となり、RSSI および位相値の場所に対する一意性に欠け、推定精度低下の一因となる。電波環境の歪みの影響を受けた RSSI および位相値がグリッドレベルで一意になることを利用する。実証実験を通して、複数の分類アルゴリズムによるグリッド推定精度を比較する。

キーワード：RFID, 位置推定, ダブルアンテナ

## 1. はじめに

現在、産業界において、Radio Frequency Identification (RFID) の利用が拡大している。特に小売業では、無人レジにおける会計や在庫管理の自動化、顧客行動分析において RFID が活用されている [1–5]。RFID は、リーダーと RF タグが無線通信を行うことにより、RF タグの個体識別を可能とする技術である [6]。RF タグは自身の識別子である Unique Item Identifier (UII) を保有しており、リーダーは UII を受け取ることで RF タグの識別を行う。小売業における RFID システムでは、RF タグを値札に埋め込むことで、RF タグの UII を元に商品を識別する。周波数帯域としては、High Frequency (HF) 帯や Ultra High Frequency (UHF) 帯が主に利用されている [7]。中でも、数 m 離れた

複数の RF タグのデータを読み書き可能であることから、小売業では主に UHF 帯域が使用される [8]。

在庫管理や行動分析などの RFID を用いたサービスは、RF タグの位置推定技術により実現されている。既存の位置推定技術には、位置の基準となる RF タグを設置する手法が存在する [9]。この手法では、推定対象範囲に対してリーダーやアンテナを各 4 枚設置し、さらに位置の基準となる RF タグを床や壁に一定距離ごとに設置する。RF タグからの応答信号の受信信号強度である Received Signal Strength Indicator (RSSI) を用いて推定を行う。基準タグと推定対象の RF タグのそれぞれの RSSI を機械学習により比較することで RF タグの位置を推定する。また、基準タグを使用しない位置推定技術として、位相値を用いた手法が存在する [10]。この手法では、位相値からアンテナから RF タグまでの距離を推定することで位置推定を実現する。対象範囲に対してアンテナを 4 枚設置し、各アンテナで位相値を取得する。各アンテナからの距離をそれぞれ推定し、4 つの推定値を組み合わせることにより RF タグの位置を推定する。こうした手法では、複数の機材を導入するコストや、解析に時間を要する点が課題として挙げられる。一方で、アンテナを 2 枚用い、RSSI から位置推定を行う手法が存在する [11]。この手法では、指向性アンテナ 2 枚を角度をつけて設置することにより、対象範囲内で RSSI が一意となるこ

<sup>1</sup> 愛知工業大学大学院経営情報科学研究科  
Graduate School of Business Administration and Computer Science,

Aichi Institute of Technology, Nagoya, Aichi 464-0807, Japan

<sup>2</sup> 愛知工業大学情報科学部

Faculty of Information Science,

Aichi Institute of Technology, Toyota, Aichi 470-0392, Japan

<sup>3</sup> AIM Japan

a) yukina@pluslab.org

b) mizuno47@pluslab.org

c) naito@pluslab.org

d) masaki.ehara@aim-jp.org

とを利用する。取得した RSSI と位置の関係を用いて、機械学習により RF タグの位置推定を実現する。しかし、RSSI は距離減衰や周囲環境の影響を受け変動しやすいという問題がある [12–14]。

本研究では、アンテナ 2 枚を用い、RSSI と位相値を用いた位置推定手法を提案する。前述したように、RF タグの既存位置推定手法には、RSSI の不安定性により位置推定精度が低下するという課題が存在する。そこで提案手法では、RSSI に加え、RF タグとアンテナ間の距離の指標となる位相値を組み合わせることで、位置推定の精度向上を図る。また、推定対象範囲に対して、2 枚のアンテナをそれぞれ角度をつけて設置することにより生じる電波環境の歪みを利用する。電波環境の歪みを生成することで、電波環境が左右非対称となり、RSSI と位相値の組み合わせの一意性を高める。さらに、対象範囲に対してグリッドを複数設定し、各グリッドにおいて一意となる RSSI と位相値の組み合わせを推定に用いる。すなわち、RF タグを読み取った際に算出される RSSI および位相値を機械学習に用いることで、グリッドレベルでの位置推定を実現する。提案手法の評価を行うために、プロトタイプを実装し、検証を行う。対象範囲に 50 個のグリッドを設定し、各グリッドにおける RSSI および位相値を取得する。RF タグを回転させた状態でデータ収集を行うことで、様々な向きにおける RF タグのデータを収集可能である。

## 2. 提案システム

### 2.1 概要

本研究では、角度付きアンテナを用いた、RSSI と位相値ベースの RF タグ位置推定手法を提案する。既存の RF タグ位置推定手法には、多数のアンテナ使用による導入コストの課題が存在する。また、アンテナ 2 枚を用いた手法では、RSSI のみを使用するため、周囲環境の影響を受けやすいという問題がある。

これらの課題を解決するため、本研究では、アンテナ 2 枚を用い、RSSI に加えて位相値を組み合わせた位置推定手法を提案する。また、RF タグからの応答信号から算出されるパラメータを用いる手法では、推定対象範囲内におけるパラメータの組み合わせの一意性が、位置推定の安定および精度向上に繋がる。そのため、提案手法では、アンテナ設置角により生じる電波環境の不均衡を利用する。RF タグはアンテナからの電力供給により動作し、受け取る電力量に伴い RSSI が変化する。そのため、RSSI の場所に対する一意性向上には、通信範囲内において、アンテナから放出される電波強度が場所に対して一意となる電波環境の生成が必要である。そこで、提案方式では、アンテナを傾けて設置することで電波環境に歪みを生じさせる。電波環境の歪みにより、各地点における RSSI が一意となる。また、位相値は波長と信号の通信距離により変化する値であるため、アン

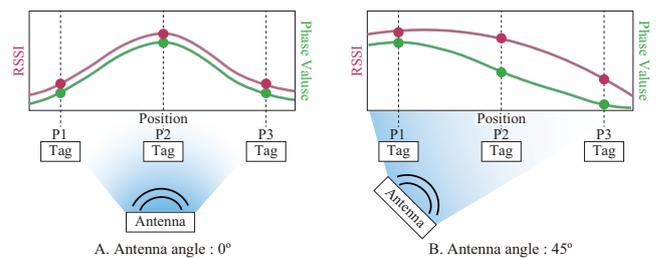


図 1 アンテナ設置角度による RSSI および位相値の変化

テナの角度から受ける影響は少なく、アンテナからの距離により変動する。パッシブタグの特性上、アンテナと RF タグ間の角度により、RF タグの受信感度が変化する。受信感度の変化に伴い RSSI も変化するため、同一地点であっても様々なパターンの RSSI が想定される。位相値は、アンテナと RF タグ間の通信距離の指標となる値であるが、RSSI と同様に RF タグの角度の影響を受ける。RSSI および位相値単体での位置推定では、アンテナと RF タグ間の角度による影響の解決が困難である。提案手法では、変化要因の異なる RSSI と位相値を組み合わせることで、読み取った RF タグの位置推定を実現する。

また、RSSI および位相値は RF タグの角度により変動するため、事前に測定した値との比較による位置推定では、推定精度の低下が考えられる。そこで、本研究では、RF タグの位置と RSSI および位相値の関係性を機械学習により判別し、位置推定を行う。通信範囲内の全ての地点における RSSI および位相値を取得するには膨大な学習コストがかかる。そのため、通信範囲内に複数のグリッドを設定し、分類器によるグリッド推定により位置推定を実現する。

### 2.2 アンテナと RSSI の関係

提案手法では、指向性アンテナを角度をつけて設置する。指向性アンテナは、特定方向に電波放射を集中させることにより、電波を特定方向に対して高出力で放射することが可能である。また、近年の RFID システムで使用される RF タグはパッシブタグであり、アンテナから放射される電波から電力供給を受けることで動作する。よって、アンテナから読み取り可能な状態、すなわち RF タグが動作するためには十分な電力供給が必要である。こうした背景から、読み取り精度向上のために指向性アンテナを正面に向け、通信範囲内の通信感度を満遍なく高めるように環境設計することが一般的である。

図 1-A に、指向性アンテナを正面に設置した場合における RF タグの位置と RSSI および位相値の関係を示す。RSSI はアンテナの正面となる地点で最大値となり、左右に移動するに従って減少する。また、RF タグの移動に伴い、アンテナを中心として左右対象に変化するため、左右の 2 箇所で RSSI が一致する。すなわち、アンテナを正面に向けて RF タグの位置推定を行う場合、推定結果の候補となる

地点が2箇所存在し、位置の判別が困難となる。そのため、位置推定の実現には、通信範囲内の任意の点における RSSI の一意性が高まるような電波環境を生成する必要がある。

そこで、提案方式では、指向性アンテナを傾けて設置することで電波環境に歪みを生成する。指向性アンテナが放出する電波は、移動距離が長くなるにつれて減衰量が大きくなる。減衰に伴い RSSI も減少するため、RSSI はアンテナと RF タグ間の距離による影響を大きく受ける。また、RSSI は受信電力に関するパラメータであり、ゲインにより変化する値である。そのため、アンテナのゲインが最大となる指向性正面方向の向きの影響を大きく受ける。すなわち、RSSI は、アンテナと RF タグの距離が近くなる場合に加え、アンテナの正面となる場合においても値が増加する特性を持つ。以上のことから、アンテナを傾けて設置することで電波環境における左右の均衡を崩すことが可能である。図 1-B に、指向性アンテナを 45° 傾けて設置した場合の RF タグの位置と RSSI および位相値の関係を示す。アンテナの傾きにより生じた電波環境の歪みに応じて、RSSI の変化は左右非対称となる。このように、アンテナ角により、通信範囲内の任意の地点における RSSI の一意性を高める電波環境を生成することで位置推定を可能とする。

### 2.3 アンテナと位相値の関係

位相値は、電波の波長と通信距離に関連するパラメータである。アンテナと RF タグの物理的な位置関係の影響を大きく受け、アンテナと RF タグ間の距離の指標となる。図 1-A に示したように、アンテナを正面に向けて設置した場合、アンテナとの距離が最短となる地点で最大となる。また、図 1-B で示したように、アンテナを 45° 傾けて設置した場合においても、アンテナとタグの距離に応じて変化する。結果として、アンテナを傾けることで、RSSI と同様に左右非対称の変化となる。

### 2.4 アンテナ・タグ間の角度による影響

提案手法では、一般的な RFID システムと同様にパッシブタグの使用を想定する。RFID システムでは、アンテナから放射される電波のエネルギーを通してタグが動作するための電力を供給する。そのため、RSSI は RF タグが受ける電力供給量に応じて変化する。電力供給量の変化要因のひとつとして、タグとアンテナ間の角度変化が挙げられる。

図 2 に、RF タグとアンテナ間の角度による RSSI および位相値の変化を示す。アンテナとタグがお互いに正面となる配置の場合、RF タグは最も効率よく電力供給を受けることが可能である。より多くの電力を受け取った RF タグは、より強い信号強度で自身のデータを返送可能である。結果として、図 2 で示すように、アンテナに対する RF タグの角度が 0° および 180° の時に RSSI が最大となる。一方で、アンテナと RF タグ間の角度が直角に近いほど、RF タグが

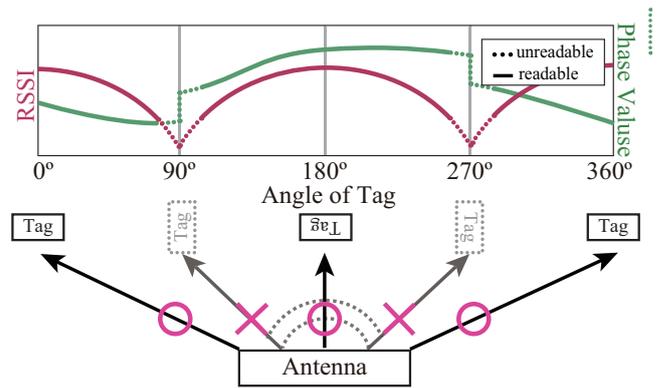


図 2 RF タグとアンテナ間角度による RSSI の変化

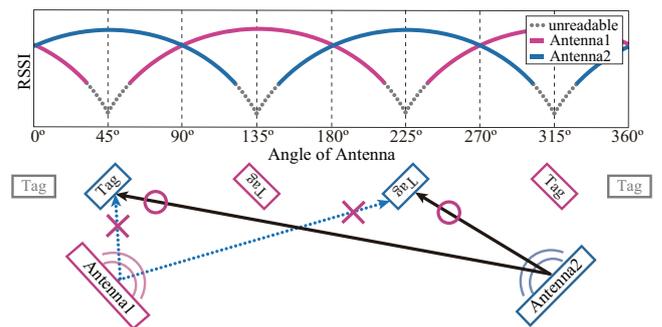


図 3 RF タグの角度と各アンテナにおける RSSI の関係

受け取る電力量が減少する。よって、90° および 270° 付近のように、RSSI が低下し、電力不足による動作不良が生じる。また、位相値も RF タグの角度が直角となる地点の付近で大きく変動する。同じ地点で算出された値に大きな変動があるため、位相値単体による位置推定は困難であると考えられる。提案手法では、在庫管理や盗難防止ゲートなど、RF タグのおおよその位置が必要とされるサービスを想定している。RF タグは通常は物などに貼り付けて利用するなど、特定の方向を向けて利用することは困難である。そのため、さまざまな RF タグの角度に対する位置推定技術が必要である。

提案手法では、対象範囲に対して指向性アンテナを 2 枚設置することで、1 枚のアンテナの電波状況が悪い場合にも、別の 1 枚のアンテナの電波状態が悪くなることを避けることにより、アンテナと RF タグ間の様々な角度に対応する。図 3 に、2 枚のアンテナを中央に向けてそれぞれ 45° ずつ傾けた場合の RSSI と位置の関係を示す。RF タグの角度が 135° および 315° の時、RF タグとアンテナがそれぞれ正面となり、RF タグへの電力供給が最も効率的となる。そのため、アンテナ 1 における RSSI は、RF タグが 135° および 315° の時に最大となる。また、RF タグの角度が 45° および 225° の時、RF タグとアンテナ 1 の成す角度が直角に近くなり、RSSI が低下する。一方で、RF タグの角度が 45° および 225° の時、RF タグとアンテナ 2 は互いに正面となり、RSSI が最大となる。したがって、アンテナ 1 において、供給電力の不足により読み取りが困難な状態であっ

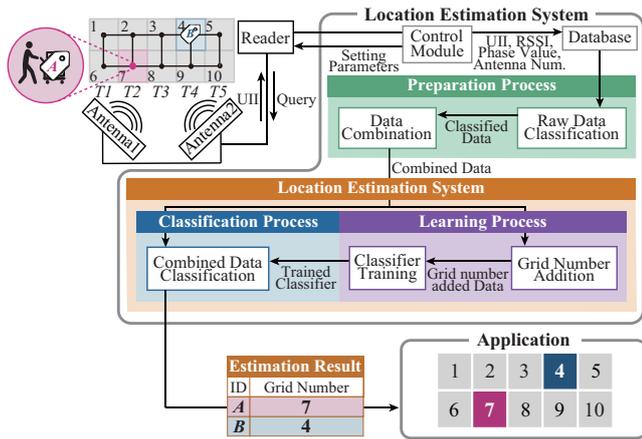


図 4 システムモデル

でも、アンテナ 2 で電力供給および RF タグの読み取りが可能である。同様に、アンテナ 2 が RF タグを読み取り困難な状態であっても、アンテナ 1 による読み取りが可能である。以上のように、一方のアンテナからの電力供給および読み取りが困難であるとき、もう一方のアンテナにより対応可能である。よって、2 枚の指向性アンテナを中央に向けて同一角度傾けて設置することで、様々な角度の RF タグを読み取り可能となり、RF タグの読み逃しを防止することが可能である。

## 2.5 システムモデル

図 4 に、提案するシステムモデルを示す。提案システムでは、対象範囲に対して電波環境の歪みを生成するため、指向性アンテナを角度をつけて設置する。また、RF タグの様々な角度に対応するため、指向性アンテナを 2 枚設置する。

位置推定システムは、制御モジュールを介したリーダの制御、RSSI および位相値の取得、機械学習を用いた位置推定を行う。リーダは、RF タグのデータを取得するための Query コマンドをアンテナ経由で送信する。Query コマンドを受信した RF タグは、自身のデータを反射波に乗せて送信する。リーダは RF タグから識別子である UII を取得する。また、RF タグからの信号を受信する際に、RSSI や位相値が算出され、RF タグを読み取ったアンテナ番号とともにデータベースに格納される。データベースに格納された元データを直接機械学習に用いるのは困難であるため、機械学習を行う前に準備処理を行う。機械学習に用いるデータの準備として、元データの分類に加え、各アンテナにおける RSSI および位相値を結合する処理を行う。機械学習の手順は、学習プロセスと分類プロセスに分けられる。学習プロセスでは、RSSI および位相値の結合処理により生成されたデータ（以降結合データと呼ぶ）と、グリッド番号を用いて分類器を作成する。分類プロセスでは、作成された分類器に結合データを入力し、RF タグの位置推定を行う。

アプリケーションでは、位置推定システムによる位置推

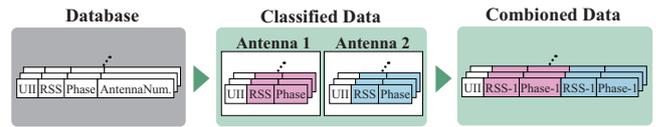


図 5 準備プロセスにおける各処理のデータ形式

定結果の可視化を行う。アプリケーションは、位置推定結果としてグリッド番号を受け取り、時系列データとして保持する。

## 2.6 位置推定システム

位置推定システムは、取得した RSSI および位相値を用いて、RF タグが位置すると考えられるグリッドを推定し、アプリケーションへ推定結果と UII を出力する。グリッド推定には、機械学習による分類器を使用するため、機械学習に適した形式へとデータ変換を行う必要がある。そのため、取得データはデータベースに格納される。準備プロセスでは、データベースに格納されたデータを分類および結合することにより、機械学習に使用可能な形状に変換する。機械学習では、準備プロセスにおいて生成した結合データとグリッド番号を用いて推定を行う。分類器の学習を経て分類器によるグリッド推定が行われる。推定後、機械学習によるグリッド推定の結果と UII をアプリケーションへ出力する。

### 2.6.1 準備プロセス

リーダは、RF タグを読み取ると、UII および RSSI、位相値、読み取ったアンテナ番号を 1 つのレポートとしてまとめて出力する。また、リーダにアンテナが複数接続されている場合、各アンテナが RF タグを読み取る度にレポートが出力される。つまり、同一の RF タグを 2 枚の異なるアンテナが読み取った場合、各アンテナごとに異なるレポートが 1 枚ずつ生成され、計 2 枚のレポートが出力される。出力されたレポートはアンテナごとに分類されておらず、異なるアンテナまたは異なる RF タグのレポートが混在する状態である。提案手法では、分類器に対してグリッド位置と RSSI および位相値の関係性を学習させる。学習の特徴量として、2 枚のアンテナで算出される RSSI および位相値を用いる。そのため、アンテナ番号が異なる同一 RF タグのレポートを結合する必要がある。そこで、位置推定システムでは、機械学習の準備処理として、元データの分類および各アンテナが算出したデータの結合処理を行う。

図 5 に、準備プロセスにおける各処理のデータ形式を示す。位置推定システムは、リーダが出力したレポート内のデータをデータベースに格納する。元データ分類処理では、データベースに格納されたデータを各アンテナ番号ごとに分類する。データ結合処理では、各アンテナごとに分類されたデータのうち、RF タグの UII が同一であるデータを抽出し、データを結合する。以上の処理により、1 つの結合

データに各アンテナが算出したデータが含まれ、さらに UII ごとに整理されるため、分類器に使用可能なデータが生成される。

### 2.6.2 機械学習

機械学習には、準備プロセスにおいて生成された結合データを使用し、分類器の作成およびグリッド位置推定を行う。学習プロセスでは、推定の事前プロセスとして、結合データとグリッド位置の関係性を分類器に学習させる。グリッド位置を分類器での学習に用いるため、各グリッドに対して識別番号を設置する。グリッド番号追加処理では、結合データに対して、データを計測した位置のグリッド番号を正解ラベルとして追加する。結果として、分類器の学習に用いるデータには、2組の RSSI および位相値に加え、グリッド番号が含まれる。グリッド番号が追加されたデータを分類器に入力することで、各グリッドにおける RSSI および位相値の傾向を学習させる。

分類プロセスでは、学習プロセスで生成された分類器を使用してグリッド位置推定を行う。分類器に対して、結合されたデータを入力する。分類器には2組の RSSI および位相値が入力され、入力された値がどのグリッドの傾向に対応するかを分類する。推定されたグリッド番号は、対象 RF タグの UII とともに出力される。このようにして、位置推定システムは、各アンテナにおける算出値を利用してグリッド位置推定を行う。

## 3. 実験および検証

### 3.1 概要

本章では、提案システムの位置推定精度についての検証を行う。検証にあたり、提案システムのプロトタイプを実装し、データ収集のため実験を行った。検証では、収集したデータを用いて、機械学習による位置推定の精度を確認する。提案方式では、各グリッドで取得した RSSI と位相値の組を分類器に学習させ、RF タグの位置を推定する。最後に、実際の現場では、アンテナ1枚のみでの実現が理想的であるため、設置角度付きアンテナ1枚のみでの精度を確認する。

### 3.2 プロトタイプ実装

本研究では、提案システムモデルのプロトタイプを実装した。RFID リーダには Impinj 社製 Speedway Revolution R420、アンテナには指向性アンテナである Yeon 社製 YAP-101CP を用いた。また、制御モジュールとして、Impinj Octane SDK ReadTags モジュールを使用した。Octane SDK は、Impinj 社製リーダ用の、NET および Java アプリケーションをサポートする開発ライブラリである。Octane SDK は、リーダを制御するためのプロトコルである Low Level Reader Protocol (LLRP) をラップしている。そのため、LLRP の知識が無い開発者でも、リーダの制御および

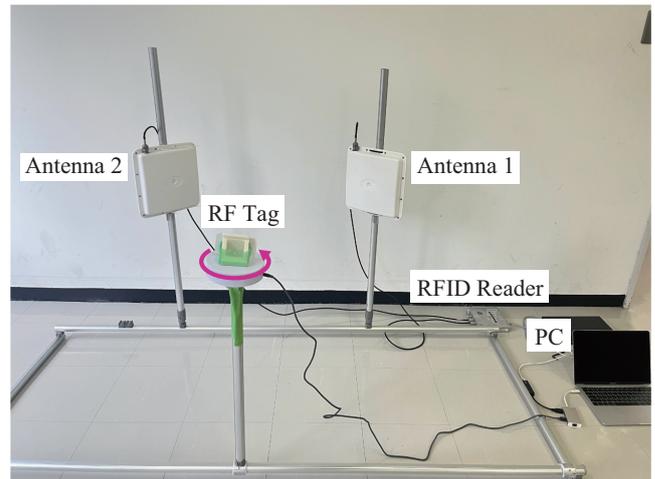


図 6 実験環境

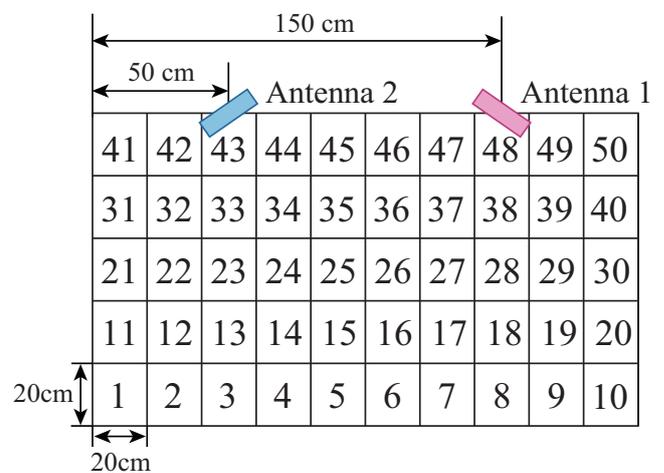


図 7 グリッド配置図

データ取得が可能である。ReadTags モジュールでは、使用するリーダの指定や送信信号の出力強度などの設定値、読み取りモードの指定が可能である。本研究では、受信感度を  $-84$  dBm とし、読み取りモードは読み取り速度が速い DualTarget モードに指定する。

データベースの実装には MySQL を使用し、準備プロセスは Python にて実装を行った。また、機械学習は Python の機械学習ライブラリである Scikit-learn で実装を行った。また、Scikit-learn はデフォルトパラメータで十分に機能することが知られているため、本実装では、デフォルトパラメータを使用した。

### 3.3 実験およびデータ収集

図 6 に、データ収集のための実験環境を示す。提案方式では、アンテナを2枚使い、中央に向けて同角度傾けて設置する。また、アンテナとタグの高さは 600 mm に設定した。リーダは PC と接続され、PC 内の制御モジュールにより制御される。

図 7 に、本実験で設定したグリッド配置を示す。本稿で

表 1 各分類アルゴリズムにおける位置推定精度

metric model	accuracy	precision <sub>M</sub>	recall <sub>M</sub>	f1 - score <sub>M</sub>
RF	0.9142 ±0.0001%	0.9155 ±6.6030%	0.9142 ±9.1358%	0.9146 ±7.7732%
DT	0.8723 ±0.0001%	0.8723 ±0.0001%	0.8723 ±0.0001%	0.8723 ±0.0001%
k-NN	0.8405 ±0.0002%	0.8464 ±0.0002%	0.8405 ±0.0002%	0.8413 ±0.0002%

表 2 RF アルゴリズムによるアンテナ 1 枚での位置推定精度

accuracy	precision <sub>M</sub>	recall <sub>M</sub>	f1 - score <sub>M</sub>
0.5876 ±0.0002%	0.6121 ±0.0002%	0.5876 ±0.0001%	0.5928 ±0.0002%

は、在庫管理における倉庫の出入り口や盗難防止ゲートでの使用を想定しているため、推定対象範囲を 2,000 mm × 1,000 mm とする。さらに、対象範囲内に 200 mm 四方のグリッドを 50 個設定した。

また、実際の現場では、さまざまな角度の RF タグに対応する必要がある。そのため、RF タグを各グリッドで回転させた状態で実験を行い、様々な RF タグの向きにおける RSSI および位相値のデータを収集した。各グリッドにおいて 20,000 件のデータを収集し、対象範囲全体では 1,000,000 件のデータを収集した。

### 3.4 検証評価

本研究では、機械学習の分類アルゴリズムによる位置推定精度の評価を行う。実験で収集した 1,000,000 件のデータの内、80%を分類器の学習データセットとして使用し、残り 20%を分類器のテストデータセットとして使用した。

#### 3.4.1 分類アルゴリズムによる推定精度の比較

本検証では、複数の分類アルゴリズムによる位置推定精度を比較する。分類アルゴリズムとして、ランダムフォレスト (RF)、決定木 (DT)、k 近傍法 (k-NN) を使用した。表 1 に、各分類アルゴリズムにおける位置推定精度を示す。ここで、 $M$  はマクロ平均を意味する。表 1 より、RF アルゴリズムによる位置推定が高精度で可能であることがわかった。一方で、DT および k-NN アルゴリズムでは、精度が 90%を下回り、誤分類が多くみられた。誤分類の原因として、RF タグが回転することで RSSI および位相値が変動し、他グリッドにおける値と類似する場合がある。低精度の分類アルゴリズムでは、複数グリッド間で類似した RSSI および位相値を正確に分類することが困難であったために精度が低下したと考えられる。

#### 3.4.2 アンテナ 1 枚による位置推定精度

実現場への導入を想定した場合、設置環境や導入コストを考慮すると、アンテナ 1 枚のみで位置推定が実現可能であることが望ましい。しかし、RF タグの向きによる RSSI および位相値の変動や、通信不可能な場合が発生するため、アンテナ 1 枚では、位置推定精度が低下すると考えられる。

アンテナ 1 枚での推定精度を確認し、アンテナ 2 枚の場合の精度を比較することで、アンテナ 1 枚による推定の実用性を確認する。先述したように、提案方式には RF アルゴリズムが適切であることを確認したため、RF アルゴリズムの推定精度を確認する。表 2 に、アンテナ 1 枚のみを使用した場合の位置推定精度を示す。表 2 より、アンテナ 1 枚での推定精度は 60%前後の結果となった。アンテナ 2 枚の場合と比較すると、約 30%の精度低下が見られた。アンテナ 1 枚のみを使用した場合では、RF タグの角度による影響に対応困難であることで、大幅に精度が低下したと考えられる。結果として、アンテナ 1 枚による推定では、実用において許容困難であると考えられる。

## 4. まとめ

本稿では、RSSI と位相値の組み合わせを用いたグリッド単位の位置推定手法を提案した。既存の位置推定手法では、多数の機材を使用することによる導入コストの課題が存在する。また、アンテナの使用枚数を 2 枚に抑えた手法では、RSSI のみを用いることで、周囲環境からの影響を受けやすいという問題がある。そのため、本論文では、アンテナ 2 枚を用い、RSSI と位相値の組み合わせを元にした位置推定手法を提案した。提案手法では、変化要因の異なる 2 つのパラメータを用いることで位置推定精度の向上を図る。また、さらなる精度および安定性の向上を目的とし、角度を設けてアンテナを設置することで、電波環境の歪みを生じさせ、左右非対称となる電波環境を生成する。対象範囲内にグリッドを設定することで、各グリッドでの RSSI と位相値の組み合わせが一意となることを利用する。

本稿では、提案方式のプロトタイプを実装し、実証実験を通して検証を行った。位置推定精度の検証では、異なる 3 つの分類アルゴリズムを用いて推定精度を比較し、提案方式による位置推定が可能であるかを検証した。検証の結果、RF アルゴリズムによる位置推定が 90%以上の精度で可能であることを確認した。

## 参考文献

- [1] Depatla, S. and Mostofi, Y.: Occupancy Analytics in Retail Stores Using Wireless Signals, *2019 16th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*, pp. 1-9 (online), DOI: 10.1109/SAHCN.2019.8824911 (2019).
- [2] Yong, A., Rana, M. E. and Shanmugam, K.: Improved Shopping Experience Through RFID Based Smart Shopping System, *2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA)*, pp. 635-644 (online), DOI: 10.1109/DASA54658.2022.9765064 (2022).
- [3] Landmark, A. and Sjøbakk, B.: Tracking customer behaviour in fashion retail using RFID, *International Journal of Retail & Distribution Management*, Vol. 45, pp. 00-00 (online), DOI: 10.1108/IJRDM-10-2016-0174 (2017).

- [4] Li, D.-Y., Xie, S.-D., Chen, R.-J. and Tan, H.-Z.: Design of Internet of Things System for Library Materials Management using UHF RFID, *2016 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, pp. 44–48 (online), DOI: 10.1109/RFID-TA.2016.7750755 (2016).
- [5] Skowron-Grabowska, B. and Szczepanik, T.: Application of RFID technologies in logistics centres to improving operations of courier firms, *2017 IEEE International Conference on RFID Technology Application (RFID-TA)*, pp. 140–145 (online), DOI: 10.1109/RFID-TA.2017.8098895 (2017).
- [6] FarahinAzahar, T., Mahinderjit-Singh, M. and Hassan, R.: RFID-Enabled Supply Chain Detection Using Clustering Algorithms, *Proceedings of the 9th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication, IMCOM '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery*, (online), DOI: 10.1145/2701126.2701140 (2015).
- [7] Zhang, J., Tian, G. Y., Marindra, A. M. J., Sunny, A. I. and Zhao, A.: A Review of Passive RFID Tag Antenna-Based Sensors and Systems for Structural Health Monitoring Applications, *Sensors (Basel, Switzerland)*, Vol. 17 (2017).
- [8] Finkenzerler, K.: *Rfid handbook: Fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication*, third edition (2010).
- [9] Durtschi, B., Mahat, M., Mashal, M. and Chrysler, A.: Preliminary Analysis of RFID Localization System for Moving Precast Concrete Units using Multiple-Tags and Weighted Euclid Distance k-NN algorithm, *2021 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1109/RFID52461.2021.9444370 (2021).
- [10] Liu, T., Liu, Y., Yang, L., Guo, Y. and Wang, C.: BackPos: High Accuracy Backscatter Positioning System, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 15, No. 3, pp. 586–598 (online), DOI: 10.1109/TMC.2015.2424437 (2016).
- [11] Mizuno, K., Miwa, Y., Naito, K. and Ehara, M.: Location estimation and tracking scheme for passive RF tags with angled antennas, *2023 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp. 01–06 (online), DOI: 10.1109/ICCE56470.2023.10043471 (2023).
- [12] Omer, M. and Tian, G. Y.: Indoor distance estimation for passive UHF RFID tag based on RSSI and RCS, *Measurement*, Vol. 127, pp. 425–430 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.116> (2018).
- [13] Ryoo, J. and Das, S. R.: Phase-Based Ranging of RFID Tags with Applications to Shopping Cart Localization, *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery*, p. 245–249 (online), DOI: 10.1145/2811587.2811620 (2015).
- [14] Hauser, M., Griebel, M. and Thiesse, F.: A hidden Markov model for distinguishing between RFID-tagged objects in adjacent areas, *2017 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, pp. 167–173 (online), DOI: 10.1109/RFID.2017.7945604 (2017).