

RSSIと位相値に着目するRFタグ移動推定技術

三輪 悠季^{2,a)} 水野 虹太^{2,b)} 内藤 克浩^{1,c)} 江原 正規^{3,d)}

概要：

Radio Frequency Identification (RFID) はRFタグの値段が下がったことにより、幅広い産業で近年普及が進んでいる。また、RFタグの読み取り精度が向上したことにより、RFタグの移動検知技術への更なる利用が期待されている。多くの移動検知技術では、センサーを活用するもの、複数のアンテナを利用するものが多いが、アンテナの設置角度を設けることにより、Received Signal Strength Indicator (RSSI) の変化特徴を意識的に作り出す手法が提案されている。一方、アンテナの設置角度を設けるだけでは、RSSIの周囲環境による変動の影響を無視することはできず、環境に応じたパラメータ設定の必要性が課題であった。本稿では、周囲環境の影響を低減可能な移動検知技術として、RSSIに加えて位相値を活用する方式を提案する。提案方式では、アンテナの設置角度に応じて、RSSIと位相値のピーク到達タイミングが異なることに着目することにより、RFタグの移動方向の推定を行う。また、プロトタイプを用いた実験評価により、提案方式はRFタグの移動方向を高精度に推定可能であることを明らかにする。

キーワード：RFID, 移動検知, シングルアンテナ

1. はじめに

Radio Frequency Identification (RFID) はリーダーと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 [1]。周波数帯域としては、High Frequency(HF)帯とUltra High Frequency(UHF)帯が主に利用されているが、特にUHF帯は数m離れた複数のRFタグのデータ読み書きが可能なることから、主に物流業界やアパレル業界などを中心に導入が進んでいる [2], [3]。RFIDが導入された当初は、在庫管理やセルフレジなど、主に個数カウントを目的として利用されていた [4], [5]。現在では、読み取り精度が向上したことにより、RFタグの状態推定が可能となり、盗難防止ゲートなどでの移動検知技術への期待が高まっている [6], [7], [8]。移動検知技術を用いるサービスでは、RFタグの出入りを判別するため、RFタグの移動方向の検知が重要視される。

RFIDを用いた移動方向検知技術に関する既存技術には、アンテナを複数使用する手法や、フェーズドアレイアンテナを使用する手法が存在する [9], [10]。基礎的な移動方向推定検知手法では、アンテナを複数個並べて設置し、それぞれのアンテナがRFタグを読み取った時間差を利用する。複数アンテナを用いる手法では、複数のアンテナを設置する場所の確保が必要となる。また、フェーズドアレイアンテナを使用する手法では、電波の照射方向制御が可能なアンテナを用いるため、移動方向検知が容易である [11]。しかし、フェーズドアレイアンテナは複雑な動作を必要とするため、アンテナ自体が高価であり、導入コストが高いという課題がある。

設置スペースの確保や導入コストなどの問題を解決するために、汎用アンテナ1枚のみを用いた方向検知手法が存在する [12]。汎用アンテナ1枚を用いた手法では、角度を設けてアンテナを設置した際に、RFタグ識別エリア内においてReceived Signal Strength Indicator (RSSI)に変化特徴が生じることを利用する。アンテナを通常通り前方に向けて設置した場合、RFタグの移動に伴い、RSSIはアンテナ正面でピークに到達し、前後の増減パターンは対称に近くなる。一方、アンテナを右に傾けた状態で設置し、RFタグを右方向に移動させた場合、RSSIはピークに到達するまで急激に増加し、ピーク到達後は緩やかに減少する。よって、RSSIの増加および減少過程からRFタグの移動方

¹ 愛知工業大学情報科学部
Faculty of Information Science,
Aichi Institute of Technology, Toyota, Aichi 470-0392, Japan
² 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
³ AIM Japan
a) yukina@pluslab.org
b) mizuno47@pluslab.org
c) naito@pluslab.org
d) masaki.ehara@aim-jp.org

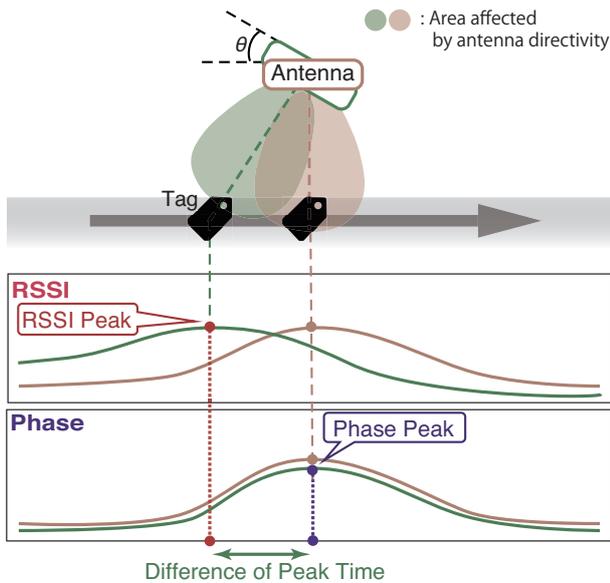


図 1 アンテナ設置角度による RSSI および位相値への影響

向を判断することによる、アンテナ 1 枚のみを用いた RF タグの方向検知が可能である。しかし、RSSI や位相値は周囲に存在するモノの材質や電波環境による影響を大きく受けるため、RF タグの位置が同じ場合にも、環境により値が異なる [13], [14], [15]。そのため、RSSI のみ、もしくは位相値のみを用いる検知手法では、各環境に合わせて設定されたパラメータを基準とすることで精度の維持を行う必要がある。

本稿では、汎用アンテナ 1 枚を用いて、RSSI と位相値の 2 値から RF タグの移動検知を行う手法を提案する。RSSI と位相値はともに、アンテナとタグ間の距離が近づくことにより増加するが、RSSI はアンテナの指向性による影響をより強く受ける。よって、RSSI はアンテナの正面でピークを迎え、位相値はアンテナとの距離が最短となる地点でピークを迎えるという特徴を持つ [16]。そのため、アンテナに設置角度を設けることにより、RSSI と位相値のピークを迎える時間に違いが生じる。RSSI および位相値は、周囲環境によって値が変動するが、ピーク時間の特徴は、どの環境においても同様に表れる。そこで、RSSI および位相値の両方を用い、ピーク時間の相関関係を利用することにより、移動方向検知における環境の依存性を軽減する。また、環境に合わせたパラメータ設定が不要となるため、システムの導入がより容易となる。提案手法の評価として、指向性アンテナと汎用リーダーライターを用いたプロトタイプの開発を実施する。そして、適切なアンテナ設置角度を選択することにより、高精度の移動方向検知が実現可能であることを明らかにする。

2. RSSI と位相値を用いた移動方向推定手法

本稿では、設置角度を設けた汎用アンテナ 1 枚を用い、RSSI と位相値に着目する移動方向推定手法を提案する。

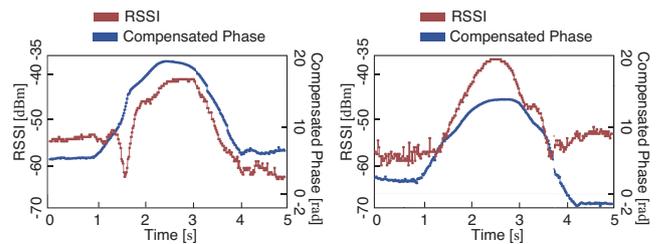


図 2 アンテナ角度 0° の位相値および RSSI の変化比較

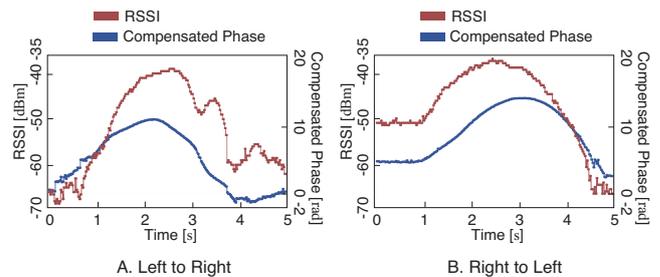


図 3 アンテナ角度 30° の位相値および RSSI の変化比較

また、盗難防止ゲートなど、RF タグがアンテナとほぼ並行に移動する状況を想定する。RF タグの移動方向検知を行うためには、RF タグの位置により変化する値に着目し、アンテナ前を通過する方向により、異なる変化特徴を捉える必要がある。しかし、RF タグの移動方向とアンテナが平行である場合、アンテナ左右の通信環境は均等に形成されるため、移動方向による変化の差異は生じにくい。そのため、アンテナ 1 枚のみを用いた検知では、角度を設けてアンテナを設置することにより、アンテナの左右の RF タグ検出エリアで異なる変化特徴を生じさせる。提案手法では、RSSI と位相値のピークのタイミングの差に着目することにより、その変化特徴を解析し、移動方向の推定を行う。

2.1 RSSI の変化特徴

RF タグと通信を行う際には、一般的に指向性アンテナを利用するが、その目的は RF タグからの受信信号強度を十分に確保するためである。本稿では、RF タグの性能が向上していることから、若干の受信信号強度が下がる可能性があったとしても、指向性アンテナの設置角度を調整することにより、アンテナ左右に形成される RSSI や位相値の場所による特徴を与えることを優先する。

図 1 に、RSSI および位相値がアンテナ設置角度から受ける影響を示す。RSSI は受信電力に関するパラメータのため、ゲインにより変化する値である。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、ゲインが上がると RSSI の値は大きくなる。結果として、RSSI はアンテナのゲインが最大となるアンテナの指向性正面を通過するタイミングでピークを迎える特性を持つ。そのため、アンテナを左に傾けた場合、アンテナの指

向性が変化し、アンテナの左右でゲインの不均衡が生じることで RSSI がピークとなる地点は左にずれる。

2.2 位相値の変化特徴

位相値は、波長と距離に関係するパラメータであるため、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る。図 1 において位相値に着目すると、アンテナの設置角度を変化させた場合にも大きな変化はなく、位相値はリーダーに最も近づく地点でピークを迎えるという特性を持つ。これは、波長が固定されているリーダーライターでは、距離が位相値を決める影響が強いためである。そのため、アンテナを傾けることで、アンテナの指向性に変化が生じた場合においても、アンテナとタグ間の位置関係は変化しないため、位相値がピークとなる地点は大きく変動しない。

2.3 RSSI と位相値の比較による移動方向推定

図 2 にアンテナの設置角度が 0° である場合の RF タグを右方向および左方向へ移動させたグラフを示す。変化過程に着目すると、RSSI と位相値は、共に緩やかに上昇すると、アンテナに最も近づくタイミングでピークを迎え、その後徐々に低下する。アンテナの設置角度を設けない時、アンテナ正面地点とリーダーと RF タグ間の距離が最短となる点は近くなるため、RSSI と位相値のピークタイミングはほぼ同じとなる。すなわち、左方向と右方向にタグを移動させた場合の RSSI と位相値の変化過程を比較すると、その特徴はほぼ同一であるため、移動方向の推定は困難である。

次に、アンテナの設置角度に着目し、アンテナの指向性を正面から 30° 左にずらして設置した場合のグラフを図 3 に示す。アンテナの指向性が設置角度によりずれることによりゲインが下がるため、RSSI の変化特徴は設置角度がない時と比べて大きく変化する。一方、位相値は設置角度が変化しても受ける影響は僅かである。また、RSSI がピークとなるアンテナ正面地点と位相値がピークとなるリーダーと RF タグ間の距離が最短となる点は異なることにより、RSSI と位相値がピークとなる地点に差異が生じる。

結果として、アンテナを左に傾けた状態で、RF タグを右方向に移動させた場合、RSSI は位相値より早くピークを迎える。一方で、RF タグを左方向に移動させた場合、RSSI は位相値より遅くピークを迎える。以上のように、RF タグの移動方向によって、RSSI と位相値がピークを迎える時間差に特徴が生じる。提案手法では、RF タグの移動方向に伴う RSSI と位相値のピークを迎える時間差に注目する。提案手法で注目する特徴は、アンテナの設置角度により制御されるものであり、環境依存の要素が小さい。そのため、環境に合わせてパラメータを個別調整しない場合にも、一定以上の認識性能が見込まれると考えている。

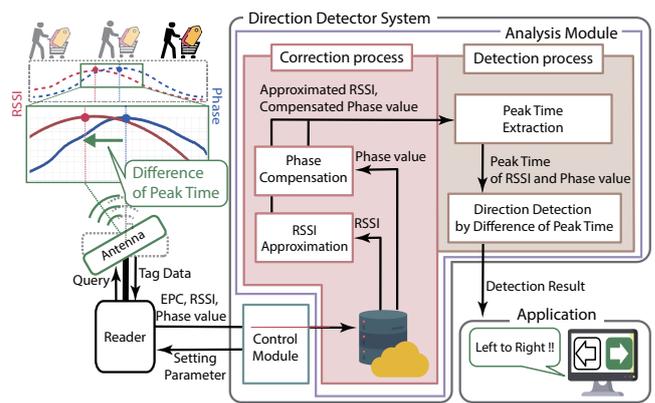


図 4 システムモデル図

2.4 システムモデル

図 4 にシステムモデル図を示す。方向検知システムは、制御モジュールを介してリーダーを制御する。リーダーは、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。リーダーは RF タグから Electronic Product Code (EPC), RSSI, 位相値などのタグデータを取得する。EPC は、RF タグが保有するユニークな識別番号である。取得したタグデータは制御モジュールを介して解析モジュールに渡される。解析モジュールは、受けたタグデータをデータベースに格納し、タグデータを解析することにより RF タグの移動方向を推定する。解析による推定結果はアプリケーションへ渡される。

3. 解析モジュールによるピーク検出

3.1 概要

解析モジュールでは、RSSI および位相値を解析することにより RF タグの移動方向検知を行う。提案手法では、アンテナの設置角度を設けることにより、RSSI と位相値がそれぞれピークを迎える時間にずれが生じるという特徴を推定に用いる。位相値と RSSI の取得データは、リーダーライターから取得される値の仕様から、直接はピーク検出が困難なため、タグデータをデータベースに格納した後、ピーク検出の準備処理として、位相値補正および RSSI の近似式算出を行うことで、ピーク検出を容易にする。RSSI の近似式と補正された位相値は各解析に用いられる。方向検知処理の第一段階として、RSSI と位相値がそれぞれピークを迎える時間を検出する。そして、ピークを迎えた時間差から移動方向の検知を行う。移動方向を検知後、検知結果をアプリケーションへ渡す。

3.2 位相値補正

RSSI や位相値は、リーダーがタグからの信号を受信した際に算出される。図 5 に、位相値算出のモデル図を示す。

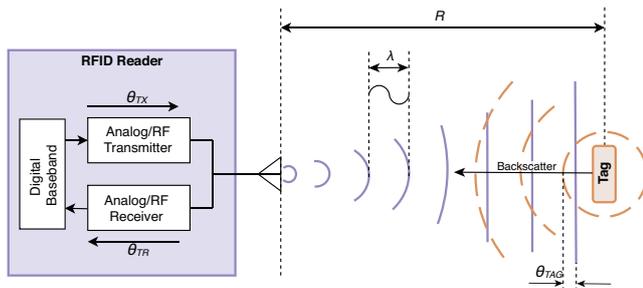


図 5 位相値算出モデル図

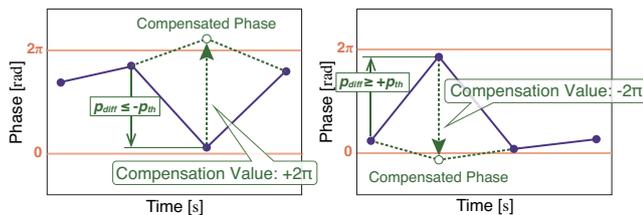


図 6 位相値補正処理手法

RFID システムでは、リーダーから送信された信号を、RF タグが返送する形で通信を行う。そのため、リーダーとタグ間の距離を R とすると、一連の通信における信号の総移動距離は $2R$ となる。また、算出される位相値は、距離による位相回転だけでなく、リーダーの送信回路や受信回路、タグの反射特性による位相回転の影響も受ける。リーダーの送信回路による位相回転を θ_{TX} 、受信回路による位相回転を θ_{RX} 、タグの反射特性による位相回転を θ_{TAG} とした場合、位相値 θ は式 1 で表される。

$$\theta = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{2R}{\lambda} \right) + \theta_{TX} + \theta_{RX} + \theta_{TAG} \quad (1)$$

ここで、 λ は、周波数 f における搬送波の波長を示し、式 2 で表される。通信媒体中の電磁波の速度を c とし、空気中における搬送波の速度は、光速 3×10^8 m/s と同等である。

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

RF タグが移動する間、アンテナと RF タグ間の距離が常に変化するため、距離による位相回転とタグの反射特性による位相回転が変化する。本来、RF タグ移動時の位相値は、 1.4π 、 1.7π 、 2.1π のように、徐々に増加または減少する。しかし、リーダーによって算出される位相値は、最小値が 0、最大値が 2π と範囲が定められている。そのため、位相値が徐々に増加する連続値であっても、算出される位相値が 1.4π 、 1.7π 、 0.1π となる場合がある。つまり、実際の位相値が最小値または最大値を超えて変化した場合、一つ前の位相値から大幅に変動し、連続値とは認識困難な値となる。したがって、位相値の変化過程を解析するためには、算出された位相値に対して補正処理を行う必要がある。

本稿では、閾値 p_{th} を設定し、一つ前の位相値からの変動値 p_{diff} の絶対値が p_{th} 以上の場合を補正対象とし、補正処理を行う。図 6 に、位相値補正処理方法を示す。一つ

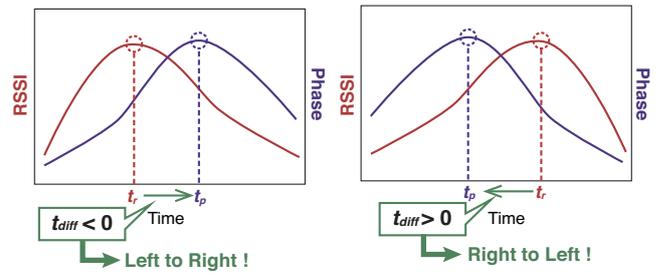


図 7 移動方向検出の概要図

前の位相値からの変動値を算出し、算出した値に応じて補正値を加算もしくは減算する。 p_{diff} が $-p_{th}$ 以下の場合、算出された位相値に $+2\pi$ の補正をかける。また、 p_{diff} が $+p_{th}$ 以上の場合、算出された位相値に -2π の補正をかける。 p_{diff} の絶対値が p_{th} よりも小さい値となる場合、補正は行わない。位相値に補正処理をかけることで、滑らかに変動する値となるため、位相値のピーク検出が容易となる。

3.3 RSSI の近似式算出

利用した機器の RSSI は、0.5 刻みで変動する仕様である。そのため、ピーク周辺に同じ値が連続することにより、正確なピーク検出が困難となる場合がある。正確なピーク検出を行うためには、RSSI の変化過程の中に 1 点のピーク点を検出することが必要である。そこで、RSSI の変化過程の二次近似式を算出する。算出した近似式のピークを RSSI のピーク地点として推定に用いる。本論文では、最小二乗法を用いて近似式を算出する。最小二乗法とは、モデル関数を $f(x)$ としたとき、式 3 が最小となるような $f(x)$ を求める方法である。

$$\sum_{i=1}^n \{y_i - f(x)\}^2 \quad (3)$$

3.4 移動方向の検出

補正後の位相値および RSSI 近似式がピークとなる時間の差から、RF タグの移動方向を推定する。提案システムでは、角度を設けてアンテナを設置した際に、RSSI と位相値のピーク時間差特徴が、移動方向によって異なることを利用する。図 7 に、アンテナを左に傾けて設置した場合の移動方向推定の概要を示す。アンテナ角度から受ける影響が少ない位相値のピーク時間を基準とし、位相値のピーク時間 t_p から見た RSSI のピーク時間 t_r の差 t_{diff} を利用する。アンテナを左に傾けて設置し、タグが右方向に移動した場合、RSSI は位相値よりも早くピークを迎えるため、 $t_r \leq t_p$ となる。よって、ピーク時間差 t_{diff} は負の値となる。一方、左方向に移動した場合、RSSI は位相値よりも遅くピークを迎えるため、 $t_r \geq t_p$ となる。よって、 t_{diff} は正の値となる。以上のことから、ピーク時間差が負の値であれば右方向、正の値であれば左方向へ移動したと判断する。

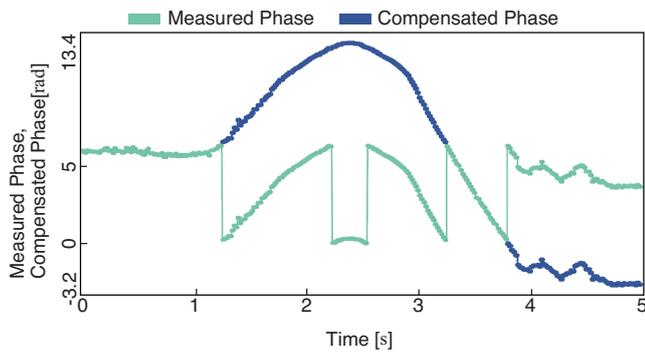


図 8 補正処理前後の位相値比較

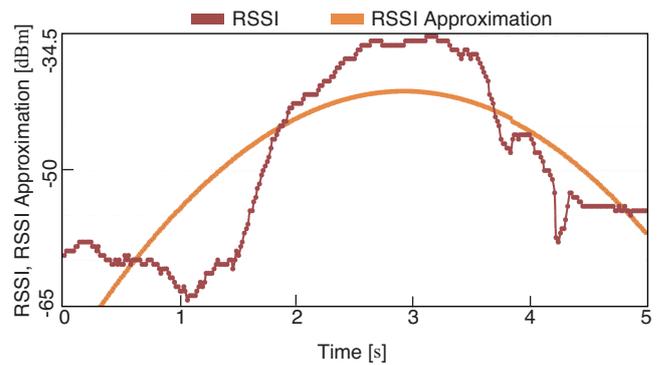


図 9 RSSI および RSSI の近似式

4. 実装

本稿では、提案手法を実装することによりプロトタイプシステムを開発した。RFID リーダーには Impinj 社製 Speedway Revolution R420、リーダーアンテナには指向性アンテナである Yeon 社製 YAP-101CP を用い、リーダーの制御モジュールには、Impinj Octane SDK を使用した。また、Django 3.2.5 を用いて解析モジュールおよび結果出力 Web アプリケーションを実装し、データベースには SQLite 3.32.3 を用いた。本稿では受信感度を -80dBm とし、読み取りモードはタグの読み取り速度が早い DualTarget モードに指定する。

システムは、制御モジュール、解析モジュールおよびアプリケーションから構成される。制御モジュールは、リーダーから受け取った EPC、RSSI や位相値といったタグデータをファイルに書き出す。リーダーは RF タグとの通信を高速で繰り返すため、タグデータが次々と取得される。RF タグとの通信回数は読み取り環境により異なるため、タグデータの取得回数は未知である。そのため、取得したデータはリスト形式で保持する。リーダーでの RF タグの読み取りが完了した時点で、各リストをファイルに書き出し、解析モジュールに渡す。解析モジュールでは、タグデータの登録および解析を行う。まず、受け取ったファイルからタグデータを読み出し、データベースへ格納する。次に、データベースからタグデータを取り出して解析し、移動方向の推定を行う。

RF タグの移動方向検知には、補正後の位相値および RSSI の近似式におけるピーク時間を用いる。二つのタグデータ間の変動幅として、 0.50π 以下の値は自然なものである。そこで、プロトタイプの補正対象を判断する閾値 p_{th} を 0.55π に設定した。図 8 に、位相値補正処理前後の位相値グラフを示す。補正前の位相値グラフでは、位相値は大幅に変動し、上下に大きくぶれが生じている。位相値が大きく変動する箇所に着目すると、位相値が 2π 付近まで増加した場合は 0 付近まで急減し、 0 付近まで減少した場合は 2π 付近まで急増している。一方、補正後の位相値グラフでは、位相値は穏やかに上昇および減少し、変化過程を

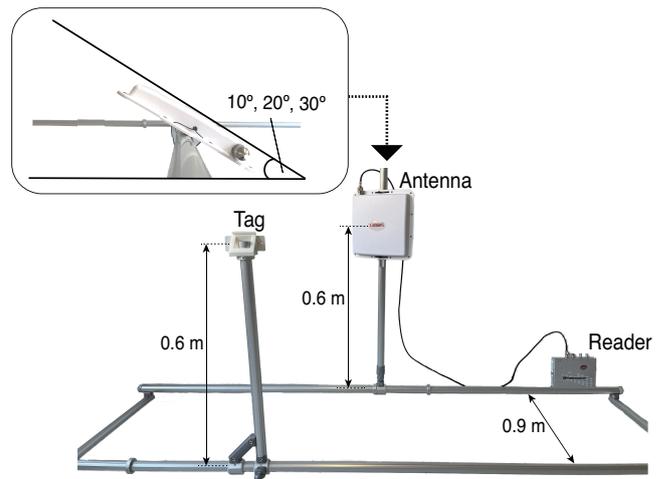


図 10 検証環境

捉えることが容易となった。なお、タグデータは離散的なサンプリングが行われているため、補正後の位相値が最大値となるタグデータのサンプル時間を位相値のピーク時間として扱う。

図 9 に RSSI および近似式グラフを示す。実装機器の RSSI の実測値は 0.5 刻みで変動するため同じ値が連続する場合がある。さらに、RSSI は細かく増減する不安定な値であるため、正確なピーク検知が困難である。そのため、算出した近似式が最大値となるタグデータのサンプル時間を RSSI のピーク時間として扱う。アンテナを左に傾けた場合、位相値のピーク時間から、RSSI のピーク時間を減算した値が負の値であれば、タグが右方向へ移動したと判断する。また、正の値であれば、左方向へ移動したと判断する。開発したプロトタイプでは、各値のグラフおよび解析結果を Web アプリケーションへ出力することで解析結果の確認を行う。

5. 検証および評価

プロトタイプを利用して、アンテナの設置角度の変化による移動方向の推定精度を評価する。検証を行う環境を図 10 に示す。アンテナの設置角度は 10° 、 20° 、 30° と変化さ

表 1 移動方向推定精度 (Place1)

angle \ direction	Left to Right	Right to Left
10°	89%	86%
20°	100%	91%
30°	100%	100%

表 2 移動方向推定精度 (Place2)

angle \ direction	Left to Right	Right to Left
10°	97%	98%
20°	100%	96%
30°	100%	100%



A. Place 1

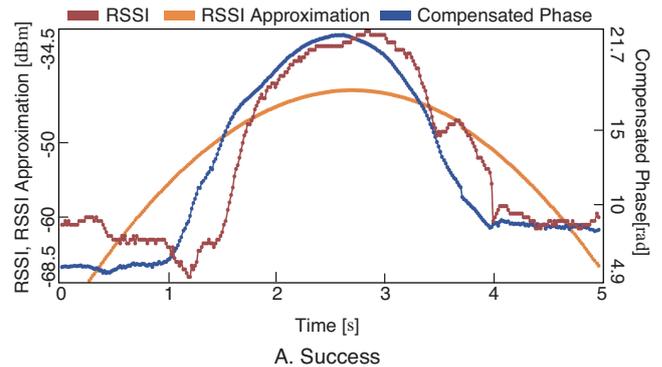
B. Place 2

図 11 検証場所

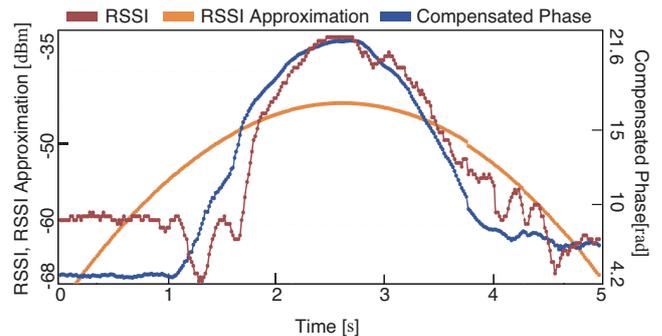
せる。RF タグとアンテナ間の最短距離を 0.9m とし、アンテナの中心と同一の高さを通過するように 0.5 m/s の速度で RF タグを移動させた。また、提案システムの環境からの影響を確認する為、周囲環境が異なる 2 箇所での測定を行う。各検証場所を図 11 に示す。まず、提案システムの基本精度を確認するため、周囲にモノが少ない環境 (Place1) において、各条件で RF タグを 500 回ずつ通過させた。さらに、提案システムの環境依存性を検証するため、周囲にモノが多い環境 (Place2) において、各条件で RF タグを 100 回ずつ通過させた。測定実験では、RF リーダーを PC に接続することにより、PC 上の制御モジュールを介してリーダーを制御した。リーダーが取得したタグデータは CSV 形式で出力され、解析モジュールに読み込ませることにより解析を行なった。そして、解析モジュールの解析結果を Web アプリケーションに出力することにより、正確に移動方向検知が行われているかを確認した。

提案システムの基礎評価として、外乱の少ない環境下である Place1 における検証を行なった。表 1 に、Place1 における設置角度の変化による移動方向推定精度を示す。表 1 より、アンテナ角度が 30° の時に最も高い精度となることが分かった。また、アンテナ角度が 10° の場合が最も精度が低く、アンテナ設置角度が小さいほど推定精度が低くなることが分かった。要因として、アンテナ設置角度が小さいほど、移動方向によるピーク時間差の特徴を検出しにくいことが考えられる。

また、外乱の多い環境下においても提案システムが動作することを確認するため、Place2 で追加検証を行なった。



A. Success



B. Failed

図 12 移動方向推定の成功例および失敗例の位相値, RSSI および RSSI 近似式比較 (アンテナ角度 10°)

表 2 に、タグを 100 回通過させた場合の移動方向推定精度を示す。表 2 により、異なる環境下であっても、正確な移動方向検知が可能であることが分かった。また、測定環境が異なる場合でも、アンテナ設置角度が大きいほど移動方向推定精度が高くなることが分かった。2 箇所での検証により、測定時の周囲環境が異なる場合であっても、アンテナ設置角度が 30° の場合において、どちらの移動方向でもほぼ 100% の精度で検知が可能であることを確認した。これは、提案システムは環境の依存性を軽減した形での移動方向検知が可能であると考えられる。

図 12 に、アンテナ設置角度が 10° でタグを左方向に移動させた場合の移動方向推定の成功例および失敗例の比較グラフを示す。成功例では、RSSI は位相値のピーク地点より後にピークに到達し、ピーク到達後一定のデータで連続することなく減少しているため、RSSI のピーク検出および移動方向推定が容易であると考えられる。一方、失敗例では、RSSI のピーク地点は同じ値が複数サンプルに渡って連続し、連続箇所が位相値のピーク地点とほとんど同時である。以上のことから、アンテナ角度が小さい場合、RSSI と位相値のピーク時間に差が生じにくいことが誤推定に繋がったと考えられる。よって、アンテナ設置角度が小さいほど精度が低下する原因として、アンテナ指向性をずらした影響が変化特徴に現れにくいことが考えられる。

6. まとめ

本稿では、指向性アンテナの設置角度を意識的に設けることにより、RSSIと位相値にRFタグの移動方向に伴う変化特徴を与えることにより、RFタグの移動方向推定が可能な手法を提案した。提案手法はRSSIと位相値のピークを迎えるタイミングの差に着目することから、システムの設置環境から受ける影響を軽減可能であり、異なる実験環境において高い移動方向推定精度を実現可能であることを明らかにした。また、アンテナ設置角度を適切に設定することにより、極めて高い精度でRFタグの移動推定方向が可能であることも明らかにした。

参考文献

- [1] 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).
- [2] Ha, O.-K., Song, Y.-S., Chung, K.-Y., Lee, K.-D. and Park, D.: Relation Model Describing the Effects of Introducing RFID in the Supply Chain: Evidence from the Food and Beverage Industry in South Korea, *Personal Ubiquitous Comput.*, Vol. 18, No. 3, p. 553–561 (online), DOI: 10.1007/s00779-013-0675-x (2014).
- [3] 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).
- [4] Shieh, H.-L. and Liao, Y.-C.: RFID restaurant POS system, *2011 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 528–531 (online), DOI: 10.1109/ICMLC.2011.6016799 (2011).
- [5] J, J. and Young, M.: Assessing the Impact of Radio Frequency Identification (RFID) System on the Inventory Management of an Auto and Heavy Machinery Parts Dealer, pp. 1–4 (online), DOI: 10.1145/3429551.3429569 (2020).
- [6] Pradhan, S. and Qiu, L.: RTSense: Passive RFID Based Temperature Sensing, *Proceedings of the 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 42–55 (online), DOI: 10.1145/3384419.3430729 (2020).
- [7] Han, J., Ding, H., Qian, C., Xi, W., Wang, Z., Jiang, Z., Shangguan, L., Zhao, J., Han, J., Ding, H., Qian, C., Xi, W., Wang, Z., Jiang, Z., Shangguan, L. and Zhao, J.: CBID: A Customer Behavior Identification System Using Passive Tags, *IEEE/ACM Trans. Netw.*, Vol. 24, No. 5, p. 2885–2898 (online), DOI: 10.1109/TNET.2015.2501103 (2016).
- [8] Asadzadeh, P., Kulik, L. and Tanin, E.: Gesture Recognition Using RFID Technology, *Personal Ubiquitous Comput.*, Vol. 16, No. 3, p. 225–234 (online), DOI: 10.1007/s00779-011-0395-z (2012).
- [9] Oikawa, Y.: Tag movement direction estimation methods in an RFID gate system, *2009 6th International Symposium on Wireless Communication Systems*, pp. 41–45 (online), DOI: 10.1109/ISWCS.2009.5285228 (2009).
- [10] Zhang, Y., Gong, X., Liu, K. and Zhang, S.: Localization and Tracking of an Indoor Autonomous Vehicle Based on the Phase Difference of Passive UHF RFID Signals, *Sensors*, Vol. 21, No. 9 (online), DOI: 10.3390/s21093286 (2021).
- [11] Toufiq Aziz, H.-g. R.: Selective Beam Switching System for RFID based WSN Communication, *2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp. 359–363 (2022).
- [12] Mizuno, K., Naito, K. and Ehara, M.: Direction estimation scheme for RFID tag with an angled single antenna, *IEEE International Conference on Radio Frequency Identification (RFID 2021)*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–2 (2021).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] Martinelli, F.: A Robot Localization System Combining RSSI and Phase Shift in UHF-RFID Signals, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 23, No. 5, pp. 1782–1796 (online), DOI: 10.1109/TCST.2014.2386777 (2015).