

RFIDを用いた屋内環境における人物の通過検知手法の検討

田中 錦乃丞¹ 沼尾 雅之¹

概要：本研究では、RFIDを用いて人物の日々の行動をモニタリングする上で有益な情報となる通過検知を手法を検討する。RFIDを用いた既存の行動認識や位置推定に関する研究ではタグのRSSI情報を活用するものが多く存在するが、RSSIに依った手法は周囲の環境変化によって精度が大きく変動するという課題があり、近年では位相情報を解析に用いる研究も増加している。本研究では、RSSIと位相情報を用いた屋内環境における人物の通過検知手法を検討し、それぞれの電波情報を用いる場合についてその精度を評価した。

A Study of Indoor Human Movement Detecting Method with RFID

KINNOSUKE TANAKA¹ MASAYUKI NUMAO¹

1. はじめに

近年ではセンサネットワーク技術の発達により、様々なセンサを活用して人物の行動をモニタリングする試みる研究が行われており、カメラ [1]、ウェアラブルセンサー [2]、RFID(Radio Frequency Identifier)[3]などのセンサーを用いて行動認識を試みているものがある。カメラやウェアラブルセンサーを用いる認識手法は個人の詳細な行動・バイタルを取得できるという利点がある反面、プライバシーの懸念や着用負荷やつけ忘れが生じるといった課題もあり、プライバシーの保護やデバイスフリーな認識を実現するためのアプローチとして、RFIDのような無線通信技術による認識を試みる研究も増加している。

人物の日常の行動をモニタリングする上で、誰がどの場所をいつ訪れたのかという動線の追跡情報は有用な情報となる。そこで本研究では、屋内環境において動線を推定するために必要な人物の通過イベントを検知するための手法を検討する。通過検知を実装するための手法としては、低負荷・低侵襲な認識を実現できるRFIDを用いることにする。RFIDとは小型の電子タグを物体に貼り付け、専用のリーダーから遠隔でその情報を読み書きする技術であり、一般的な利用場面では荷物や商品の管理において実態

のある商品をデータに紐づける目的のみで用いられているが、タグからは受信信号強度 (Received Signal Strength Indicator, RSSI), 位相といった詳細な電波情報を取得することが可能であり、この電波情報を解析することで人物の通過検知を実現するための手法を検討する。

2. RFIDを用いた移動認識に関する研究

本章では、RFIDを用いて屋内の人物の移動認識を試みている既存研究を、RSSIを用いる方針と位相を用いる方針に分類して紹介し、その利点と課題を述べる。

2.1 RSSIを用いた追跡システム

RSSIはタグから得られる電波情報の中でも扱うのが比較的容易であり、タグから発生する電波の強度 P_{Tag} と、タグを読み取るアンテナまでの距離 D によって式(1)のように求められる(K は電波の減衰係数)。

$$RSSI = P_{Tag} - K \log D \quad (1)$$

RSSIにはタグがアンテナから遠ざかる場合や、物に遮られるなどするとその値が低下するという性質があるため、式(1)によってアンテナとタグの詳細な位置関係を考慮せずとも、値の増減を利用して着用物体の検知や接近を大まかに判定できるという利点がある。

Ruanら[4]は、RFIDタグを屋内に設置し、そのRSSI変化を学習データとし、機械学習を用いて屋内の人物の移

¹ 電気通信大学大学院 情報理工学研究所 情報・ネットワーク工学専攻
The University of Electro-Communications

動経路を 1m 以下の精度で認識するシステムを実現している。環境内にタグを設置する手法の利点としては、デバイスフリーな認識を実現できるという点がある。しかし、追跡の対象が 2 人以上の場合は人物を特定できないことに加え、人の動きが複雑になることで電波情報の変動も激しくなり精度が低下するという欠点がある。また、機械学習手法を用いる場合、環境ごとに毎回データを学習する必要があり、モデル構築後も環境内で家具の移動などの変化があった場合精度が変動し得るという課題がある。

RSSI を活用する方法の 1 つに、大量のタグを均一に並べて活用するタグアレイというものがある。Yang ら [5] は、RFID タグを屋内に格子状に並べることで座標系を定義し、Particle Filter を用いて高精度の位置推定を行う手法を提案している。タグアレイの利点としては、タグ設置時点でタグ同士の関係が既知なため、位置決定が容易であるという点がある。しかし、大量のタグを利用する場合、個々のタグを把握しながら環境構築をするのは困難な作業になる。また、大量のタグを読み取る場合にはリーダーのパフォーマンスも低下してしまい、リアルタイム性が求められる場面には不向きとなる。

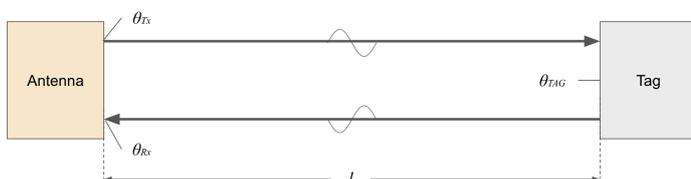
以上の点から、RSSI は扱いが容易な情報ではあるものの、信頼性に欠ける場面があり、RSSI のみで頑健な追跡システムを構築することは困難な場合が多い。

2.2 位相情報を用いた位置推定・追跡システム

RFID の位相情報とは、リーダーからタグまでの往復距離が電波波長何個分の距離に相当するかを表す情報であり(図 1)、本研究で使用したリーダー (ImpinJ R420[6]) で得られる位相 θ は以下の式 2 で表される。(λ は電波の波長、 l はタグとアンテナ間の経路、 θ_{Tx} , θ_{Rx} , θ_{TAG} はそれぞれ送信、タグ反射、受信時に生じる位相のずれを表す。) 位相情報は RSSI と同様にアンテナとタグ間の位置関係に依る値となるが、RSSI よりも細かい変化を検知できるため、位置関係の推定を行う上では RSSI よりも信頼度の高い情報となり得る。

$$\begin{cases} \theta = \left(\frac{4\pi l}{\lambda} + \mu \right) \bmod 2\pi \\ \mu = \theta_{Tx} + \theta_{Rx} + \theta_{TAG} \end{cases} \quad (2)$$

図 1 RFID の位相情報の概略図



RFID の位相情報を活用した屋内の人物追跡技術の 1 つにタグの視線速度を活用するという方針がある。これは、RFID の位相情報と位相情報を観測したアンテナに対するタグの移動方向を利用することでアンテナに対する視線速度を算出 [7] し追跡に活用するという手法である。Li ら [8] は RFID 環境に Kinect を導入し、深度画像から得られた視線速度と RFID タグの位相情報から得られた視線速度をマッチングさせ個人特定が可能な追跡システムを提案している。また、Fu ら [9] は RFID 環境にレーザー距離計を導入し、人物に着用した RFID タグの視線速度を活用した移動経路推定システムを提案しており、0.4m 以下の精度で複数人の移動経路推定を実現している。タグの視線速度を活用する手法では、人物にタグを着用することで人物の特定が可能になり、タグが軽量であることから対象にとって低負荷であるという利点がある。また、タグを着用するのは人物のみであることから環境内にタグを設置する場合よりもタグの管理コストが低く、異なる環境における導入も容易である。しかし、アンテナに対する視線速度を得るためには人物とアンテナの位置関係を把握する必要があり、それを補完するためのセンサが別途必要になるという課題がある。

位相情報の活用方法としては、位相の時系列データに現れるパターンを活用するものもある。Shangguan ら [10] はタグの位相がアンテナに最も接近するときに現れる位相系列のパターンをもとに、タグが着用された物体同士の相対距離を決定する手法を提案しており、図書館の本と空港の荷物について位置推定の実証実験を行っており、高い精度と異なる環境における導入コストの低さを示している。静止している物体や、単調な動きをする物体の位置関係の検知は位相情報の時系列情報を解析することで特定のパターンを捉えやすいため、少数のタグとアンテナのみで頑健な認識システムを構築することができる。

以上の点から、位相情報を用いた位置推定・追跡手法は異なる環境における運用能力が高く、RSSI を用いる場合よりも高い精度での認識が期待できる。

3. 動線推定のための通過検知手法の検討

本研究では、人物の日常行動の動線推定を実現するために、人物が移動する可能性のある通路や部屋の出入り口において通過検知を行う手法をとることを考える。この際、個々の検知システム同士を独立に稼働できるように設計することで、環境内の検知箇所の変更や拡張に対応しやすい動線推定システムを構築できる。以下、本研究では独立に通過検知を行う個々の検知システムを通過検知モジュールと呼ぶことにし、本章ではその構成について検討する。個々のモジュールが満たすべき要件として、「人物の検知」と「移動方向の決定」があり、RFID によってそれらを同時に実現可能な構成方法として次の 3 方針を考え、その利点と

欠点について述べる。

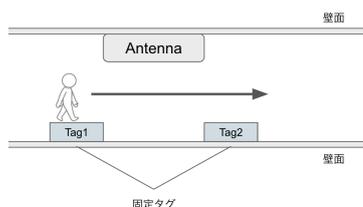
- 方針 1:参照タグと人物タグを併用する方法
- 方針 2:人物に複数のタグを着用する方法
- 方針 3:アンテナを複数設置する方法

また、それぞれの方針におけるタグの電波情報として、RSSI, 位相を用いる場合の違いについても確認し、その活用方法について検討する。

3.1 方針 1:参照タグと人物タグを併用する方法

この構成では壁面に設置されたアンテナから、対する壁面に固定された参照タグの電波情報の変化を読み取り、人物がアンテナ前を遮った際に生じる変動をもとに対象の移動検知を行う。参照タグを利用して通過検知モジュールを構成する方針の環境構成方法として、本研究では図 2 のような構成を検討する（通路の幅は 2m, 参照タグ同士の距離は 1m）。

図 2 通過検知モジュール構成図。壁面にアンテナを設置した通路を真上から見た図。



この手法では対象が移動した経路を辿るように参照タグに変化が現れるため(図 3,4), その情報を利用して対象の移動方向を検知することが可能である。この環境構成で人物にタグを着用した場合の生データの変動は図 5, 6 のようになり、RSSI は人物がアンテナに近接する時点の付近で上昇し、位相については、人物がアンテナに接近する時点で対称的な系列が現れる。したがって、壁側の参照タグが読み取れなくなった順序をもとに人物の移動方向を決定し、その間に読み取れた人物タグ情報によって人物の特定を行えば通過検知を実現できる。

この手法の利点として、検知の対象が一人のみの場合には人物タグを必要とせず、デバイスフリーな認識が可能になるという点がある。欠点としては、参照タグの設置時の調整が必要であり導入が後述の手法よりも難しくなりやすいという点がある。そのため参照タグの枚数は少なくすることが望ましい。

3.2 方針 2:人物に複数のタグを着用する方法

この方針では人物の進行方向とアンテナに対して向いている方向を判定できるように人物タグを設置することで、参照タグを用いない移動検知モジュールを実現できる。人物に複数のタグを着用する場合の環境構成方法として、本

図 3 図 2 の環境において Tag1 から Tag2 方向へ人物が直進した際の参照タグの RSSI 変動の生データ

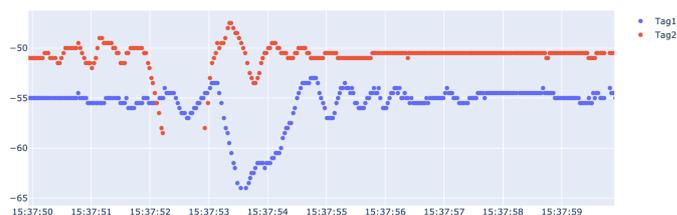


図 4 図 2 の環境において Tag1 から Tag2 方向へ人物が直進した際の参照タグの位相変動の生データ



図 5 図 2 の環境において Tag1 から Tag2 方向へ人物が直進した際の人物タグの RSSI 変動の生データ

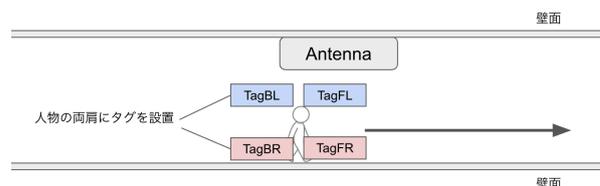


図 6 図 2 の環境において Tag1 から Tag2 方向へ人物が直進した際の人物タグの位相変動の生データ



研究では図 7 のような構成を検討する。

図 7 通過検知モジュール構成図。壁面にアンテナを設置した通路を真上から見た図。



例として、図 7 の構成で人物が左肩をアンテナが設置された壁面に向けて図中の矢印の方向に移動した際のそれぞれのタグの生データを図 8, 9 示す（アンテナと人物の距離は 1m, 片側のタグ同士の間隔は 5cm）。アンテナから見

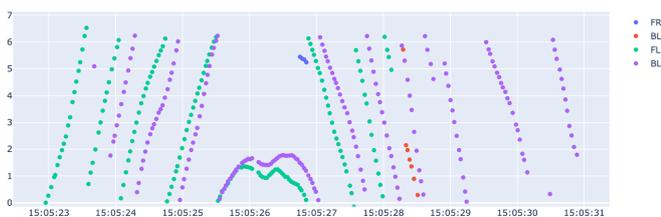
て遠くにある側の人物タグは読み取り率が低下しほとんど読み取れていないことから、人物の左右を識別できるタグが2枚以上あればその読み取り率をもとに人物の進行方向を決定できる。

この手法では、検出対象にタグを設置すればアンテナが設置されている任意の場所で通過検知を行えるため、参照タグを用いる場合より導入コストが低いという利点がある。一方、人物がどの向きで移動しているか推定するためにはタグを少なくとも4枚以上着用する必要があるタグ管理のコストが高くなる場合がある。例として、図7において左肩を向けながら矢印方向に前進した場合、矢印の終点から逆側へ後退した場合は移動の向きが異なるがその区別はつけられない。後退移動を考慮しないケースであれば人物の両側に1枚ずつのタグを着用すれば十分であるが、そうでない場合は進行方向を考慮するためのタグのペア(図7の TagFL と TagBL)を導入する必要がある。本研究では、進行方向を考慮するタグのペアを導入した手法について検討する。

図8 図7の環境において左側のタグをアンテナに向けて矢印の方向へ移動した時の各タグの RSSI 変動



図9 図7の環境において左側のタグをアンテナに向けて矢印の方向へ移動した時の各タグの位相変動



3.3 方針3:アンテナを複数設置する方法

この方針では人物の移動方向を推定できるように複数のアンテナを設置することにより、方針2よりも少数の人物タグで参照タグを用いない移動検知モジュールを実現できる。複数のアンテナを設置する場合の環境構成方法として、本研究では図10のような構成を検討する。

図10の構成では、アンテナを通路の両側の壁面に距離 l 離して設置し、人物の両肩に RFID タグを着用することで通過検知を行う。例として、図10中の矢印の方向に人物が移動し、Antenna2の読み取り圏外へ達した後矢印の逆方向へ移動した際の人物タグの電波情報の変動を図11、

図10 通過検知モジュール構成図。壁面にこのを設置した通路を真上から見た図。

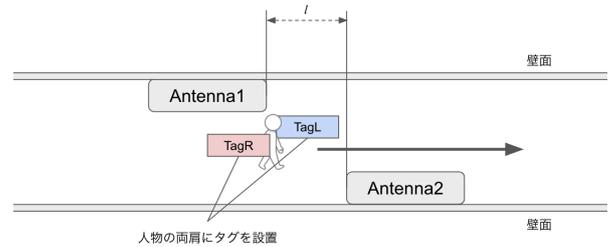


図11 図7の環境において左側のタグをアンテナに向けて矢印の方向へ移動した時の各タグの RSSI 変動

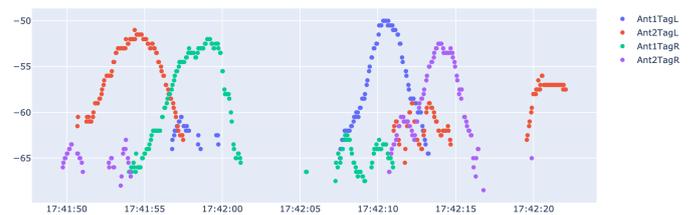
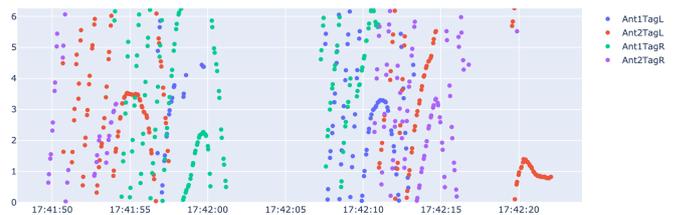


図12 図7の環境において左側のタグをアンテナに向けて矢印の方向へ移動した時の各タグの位相変動



12に示す(通路の幅は2m, l は1m)。1回の通過で右肩と左肩のタグがそれぞれ別々のアンテナで読み取られており、接近したアンテナに近い側のタグは読み取り率が高くなるため、方針2と同様の手法でアンテナに対する人物の向きを推定できる。アンテナの順序は設置時に決定されているので、読み取り率が高くなった時刻とそれを計測したアンテナがわかれば人物の移動方向を決定できる。

この方針では、アンテナの位置関係により移動方向を決定できるため、方針2のようにタグ同士に向きを識別する役割を設ける必要がなくより簡単な手法で通過を検知できる。また、図10の構成では人物のタグと読み取るアンテナの位置関係から人物の向きも推定可能な構成になっているが、アンテナとタグの設置方法はこの1通りに限らず、目的に応じて柔軟に構成できる。しかし、環境を構築するには2台以上の設置する必要があるため、設備のコストが増大してしまうという欠点がある。

4. 通過検知モジュールの実装

本章では、前章で述べた各手法の構成で通過イベントが発生した際に生じる RFID の電波情報をもとに通過検知を行う具体的な方法について述べる。

4.1 方針 1:参照タグと人物タグを併用する方法

4.1.1 参照タグの読み取り率低下検知

人物の移動方向を特定するには、複数の参照タグの読み取り率の低下が発生した時刻を特定する必要がある。利用する電波情報としては RSSI と位相の 2 種類の選択肢があるが、本研究では RSSI を利用する。位相を用いない理由は、本研究で用いたリーダーでは位相情報が $[0, 2\pi)$ の範囲でしか取得できないため、無人時に 0 や 2π 付近の位相をとる参照タグでは図 4 の Tag2 のように系列が途切れてしまい解析が複雑化するためである。これを避けるにはタグの位置調整や、前後の差分情報によって連続になるよう補完するという手法が考えられるが、RSSI を用いる場合はその手順を省くことができるという利点がある。

次に、RSSI 系列から参照タグの通過検知を行う方法を示す。初めに、得られた系列の欠損値を補うために系列を時間 τ でリサンプルし、線形補完する。リサンプルの間隔はリーダーのパフォーマンスによって調整する必要があるが、本研究では $\tau=50\text{ms}$ とした。さらに、RSSI 系列から時刻 t における参照タグの読み取り率をタグが「遮られている」「遮られていない」の 2 値で表す B_t を以下のように定める。

$$B_t = \begin{cases} 1 & \text{if } \max(\mathbf{r}_{(t-dt):t}) - \min(\mathbf{r}_{(t-dt):t}) > \theta_{rssi_diff} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$\mathbf{r}_{(t-dt):t}$ は時刻 $(t-dt)$ から t の間に観測された RSSI 系列であり、観測された RSSI の最大値と最小値の差が θ_{rssi_diff} を超えた場合に時刻 t において参照タグが遮られていると判定する。 dt は各時刻でどの程度過去の RSSI 系列を考慮するかを表す値であり、環境によって θ_{rssi_diff} とともに調整する必要がある。本研究では $dt=5\text{s}$, $\theta_{rssi_diff}=5\text{dBm}$ とした。

時刻 a から b にかけて B_t が連続で 1 となっていた場合には、時刻 $a + (b-a)/2$ を参照タグの人物通過検知時刻とし、本節では以下、参照タグ $TagX$ の通過検知時刻の集合を T_{Ref}^{TagX} で表すことにする。

4.1.2 人物タグの検知

人物のタグがアンテナ前を通過したことによって生じる電波情報の変動から、人物の通過時刻を決定する方法を示す。参照タグの場合と同様に、利用する電波情報としては RSSI と位相の 2 種類の選択肢があり、それぞれの場合について系列から通過時刻を決定する方法を以下に示す。

- RSSI 系列による通過時刻の決定方法
人物タグが通過検知モジュールのアンテナを通過すると、アンテナに接近するにつれて RSSI が増加し、離れるにつれて RSSI が減少していく系列が現れる (図 5)。したがって本手法では、人物タグ通過時の RSSI 系列が観測された際に初めて最大の RSSI が観測された時刻を人物の通過時刻とする。
- 位相系列による通過時刻の決定方法

人物タグが通過検知モジュールのアンテナを通過すると、位相系列は人物がアンテナに最接近する時点を境に対称的な系列として現れ (図 6)、タグがアンテナに対して垂直に通過する時点の付近で山型の系列が現れる。したがって本手法では、人物タグ通過によって現れる位相系列から中央の山型の系列を抽出し、そのピークの時刻を人物の通過時刻とする。以下、位相系列から通過時刻を決定する手順を示す。

(1) 連続な位相系列の抽出

位相系列の分割時刻の集合 T_{split} を以下のように定め、観測された位相系列を時刻 $t \in T_{split}$ ごとに分割する (p_t は時刻 t における位相)。

$$T_{split} = \{t \mid |p_t - p_{(t-1)}| > \theta_{split}\} \quad (4)$$

系列中の連続する 2 つの位相点の差が θ_{split} を超える時刻を分割点とし、観測された位相系列をその前後で分割する。本研究では $\theta_{split} = \pi$ とした。

(2) 山型の系列を抽出

(1) で分割された位相系列の集合を P_{split} とし、この集合に含まれる位相の部分系列 $\mathbf{p}_{a:b} \in P_{split}$ を d 分割する。ここで、 $\mathbf{p}_{a:b}$ が単調な系列かどうかを 2 値で判定する $M(\mathbf{p}_{a:b})$ を以下のように定める。

$$M(\mathbf{p}_{a:b}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{mean}(\mathbf{p}_{a:(a+d)}) \\ & \geq \dots \geq \text{mean}(\mathbf{p}_{(b-d):b}) \\ 1 & \text{if } \text{mean}(\mathbf{p}_{a:(a+d)}) \\ & \leq \dots \leq \text{mean}(\mathbf{p}_{(b-d):b}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

M は $\mathbf{p}_{a:b}$ を d 分割し、時刻 a から b にかけて分割されたそれぞれの系列の平均位相値が単調な場合は 1 となり、それ以外は 0 となる。したがって、時刻 a から b の部分位相系列において抽出すべき山型の系列は、非単調な位相系列の集合 $V_{a:b}(\forall \mathbf{p}_{s:t} \in V_{a:b}, M(\mathbf{p}_{s:t}) = 0)$ に含まれる。

- (3) 系列のピーク時刻を求める系列のピーク時刻は、(2) で求めた非単調な系列を 2 次の多項式回帰により回帰し、その極値をとる時刻として決定する [10]。多項式回帰によって極値の時刻をピーク時刻とすることで、生データに存在するノイズの影響を抑える目的がある。また、回帰の結果極値が存在しない系列についてはピーク時刻検出の対象としない。本節では、以下この手順によって求められた人物タグ $TagX$ の検知時刻の集合を T_{Human}^{TagX} と表す。

4.1.3 参照タグと人物タグ情報の統合

参照タグで検出した通過時刻には人物情報が伴わない

め、人物タグの通過検知時刻をもとに人物情報を紐づける必要がある。そこで本手法では、参照タグと人物タグそれぞれの通過検知時刻の関係から最終的なモジュールの検知時刻を出力する。

図2の構成において、Tag1, Tag2, 人物タグについて通過検知をした時刻の集合をそれぞれ $T_{Ref}^{Tag1}, T_{Ref}^{Tag2}, T_{Human}^{Tag}$ とする。このとき $t_h \in T_{Human}^{Tag}$ について、条件(6)を満たす $t_1 \in T_{Ref}^{Tag1}, t_2 \in T_{Ref}^{Tag2}$ が存在する場合、時刻 t_h に発生した通過イベントの検知結果として、モジュールは通過検知時刻 t_h と通過の方向 ($t_1 > t_2$ か $t_1 < t_2$ で判定) を出力する (θ_{pass} は検知可能な最長の通過イベントの時間, θ_{delay} は参照タグの通過検知と人物タグの検知を同期させるにあたって許容可能な遅延時間であり、本研究では $\theta_{pass} = \theta_{delay} = 5s$ とした)。

$$\begin{cases} \min\{|t_h - t_1|, |t_h - t_2|\} < \theta_{delay} \\ |t_1 - t_2| < \theta_{pass} \end{cases} \quad (6)$$

4.2 方針2:人物に複数のタグを着用する方法

本手法では、人物に取り付けられた個々のタグについて4.1.2の手法でそれぞれのタグの検知時刻を決定し、その検知時刻の順序をもとにモジュールの出力結果を求める。ここでは、人物が左肩をアンテナに向けて通過した際の通過検知時間の求め方を示す(右肩をアンテナに向けている場合も左肩と同様の手法となる)。

人物の左肩に着用されたタグ(図7)が4.1.2の手法によって検知される時刻の集合をそれぞれ $T_{Human}^{TagFL}, T_{Human}^{TagBL}$ とする。このとき、条件(7)を満たす最小の $t_{FL} \in T_{Human}^{TagFL}, t_{BL} \in T_{Human}^{TagBL}$ が存在する時、モジュールは通過検知時刻として前後のタグ検知時刻の中間時刻である $t_{FL} + (t_{BL} - t_{FL})/2$ を出力する (θ_{pass} は検知可能な最長の通過イベントの時間。本研究では $\theta_{pass} = 5s$ とした)。人物が後退しながら通過する場合についても t_{FL} と t_{BL} を入れ替えることで検知することができる。

$$\begin{cases} t_{FL} \leq t_{BL} \\ t_{BL} - t_{FL} < \theta_{pass} \end{cases} \quad (7)$$

4.3 方針3:アンテナを複数設置する方法

本手法ではアンテナごとに人物タグの通過時刻を検知し、その検知順序からモジュールの出力結果となる検知時刻と移動方向を決定する。ここでは、図10において人物が Antenna1 から Antenna2 へ移動する際のモジュールの通過検知時刻の決定方法を示す(逆向きの移動についても同様の手法となる)。

人物タグ $TagL, TagR$ の Antenna1 における検知時刻の集合を $T_{Ant1}^{TagL}, T_{Ant1}^{TagR}$, Antenna2 における検知時刻の集合を $T_{Ant2}^{TagL}, T_{Ant2}^{TagR}$ とする。Antenna1 において人物に着用されたいずれかのタグを検知した時、その時刻を

$t_{Ant1} \in T_{Ant1}^{TagL} \cup T_{Ant1}^{TagR}$ とする。この時、条件(8)を満たす最小の $t_{Ant2} \in T_{Ant2}^{TagL} \cup T_{Ant2}^{TagR}$ が存在し、 t_{Ant1} が $T_{Ant1}^{TagL} \cup T_{Ant1}^{TagR}$ に含まれる検知時刻の中でそれを満たす最大の時刻である時、モジュールは通過検知時刻としてそれぞれのアンテナにおけるタグ検知時刻の中間時刻である $t_{Ant1} + (t_{Ant2} - t_{Ant1})/2$ を出力する (θ_{pass} は検知可能な最長の通過イベントの時間。本研究では $\theta_{pass} = 5s$ とした)。

$$\begin{cases} t_{Ant1} \leq t_{Ant2} \\ t_{Ant2} - t_{Ant1} < \theta_{pass} \\ t_{Ant2} - t_{Ant1} \end{cases} \quad (8)$$

5. 評価実験

図2, 7, 10の環境を再現し、実際に環境内を通過した際の通過検知の精度を評価した。

• 使用器具

RFID リーダー: Impinj Speedway R420

RFID アンテナ: TIMES-7 Slimline A5010

RFID タグ: ALN-9770-WRW

• 評価対象のデータ

各構成において、図中の矢印の向き(図2, 7, 10)と反対側の向きの2通りについて10回ずつ合計20回の通過を行なった。通過検知を行なった環境では、アンテナと人物タグを遮る物体や人物は侵入せず、1度の通過で1人の人物が通路を通過した。

• 評価方法

人物がアンテナの正面を実際に通過した時刻の前後 θ_{pass} 時間以内にモジュールが正しい方向で通過を検知できた回数を N_{TP} , それ以外の時刻において検知される、または正しい時刻で検知したが方向が誤っていた場合の検知回数を N_{FP} とし、人物のアンテナ正面の通過を検知できなかった回数を N_{FN} とする。検知モジュールの検知正解率 (Accuracy), 適合率 (Precision), 再現率 (Recall) を以下で定める。

$$Accuracy = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN} + N_{FP}} \quad (9)$$

$$Precision = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FP}} \quad (10)$$

$$Recall = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}} \quad (11)$$

各手法についての検知結果の評価を表1, 2に示す。

5.1 考察

5.1.1 方針に関する考察

精度が最も高かったのは方針1で人物タグのRSSI情報を用いる場合で、正解率・適合率・再現率についてその他の手法に比べ最も高い結果となった。検知回数については、 $N_{TP} = 18, N_{FP} = 2, N_{FN} = 0$ となっており、 F_{FP}

表 1 20 回の通過イベントに対する各方針の検知評価

方針	人物タグの電波情報	Accuracy	Precision	Recall
方針 1	RSSI	0.9	0.9	1.00
	位相	0.65	0.93	0.64
方針 2	RSSI	0.83	0.83	1.00
	位相	0.64	0.88	0.7
方針 3	RSSI	0.32	0.34	0.8
	位相	0.05	1.0	0.05

表 2 20 回の通過イベントにおける通過検知回数

方針	人物タグの電波情報	N_{TP}	N_{FP}	N_{FN}
方針 1	RSSI	18	2	0
	位相	13	1	6
方針 2	RSSI	20	4	0
	位相	14	2	6
方針 3	RSSI	12	23	3
	位相	1	0	19

としてカウントされたのは参照タグ検知順序に基づく方向決定の誤りによるもので、検知のタイミングについては正しかった。この結果から、通過検知において参照タグが方向決定と検知漏れの防止に有用であると考えられる。

一方最も精度が低かったのは方針 3 で人物タグの位相情報を用いる場合で、 $N_{TP} = 1$ 、 $N_{FP} = 0$ 、 $N_{FN} = 19$ という結果であった。 N_{FN} が他の手法に比べて大きくなった原因としては、複数のアンテナを導入したため時間あたりの位相の読み取り数が減少し、位相系列から山型のパターンを抽出するプロセスの精度が減少したためと考えられる。また、RSSI を用いた場合では通過済/未通過のアンテナでタグが読み取らるケースも散見され、誤検知が増加する要因になっている。これは、マルチパスの影響によってアンテナがタグを読み取る範囲が想定よりも広い範囲であったことが考えられ、アンテナ同士の距離調整方法を検討する必要がある。しかしアンテナの読み取り領域を把握することは困難であり、アンテナ同士の位置決定が本方針における課題となることがわかった。

方針 2 は位相を用いた場合の再現率を除けば方針 1 と同等かそれ以下の精度となっているが、RSSI を用いた手法においては $N_{TP} = 20$ となっており、検知すべき全てのケースを検知している。正解のタイミング以外で誤検知が生じたケースでは、アンテナ側に向いていないタグの読み取り精度が高く、マルチパスの影響でアンテナの反対側のタグが読める場合があったと考えられる。

5.1.2 人物タグの電波情報に関する考察

正解率と再現率を比較すると全ての方針において RSSI を人物タグの電波情報として用いる方が高い値となる。しかし、適合率については位相を用いた場合の方が高くなっており、位相を用いる手法では、通過検知漏れが RSSI を用いる場合よりも増えるが、誤検知の数は下がっている。これは、4.1.2 の手法において、欠損値に弱い位相系列か

ら特徴的なパターンを抽出するによって通過を検知する場合よりも、観測 RSSI 系列の最大値を用いた通過検知法のほうが多くの場面で通過検知が可能なためであると考えられる。

6. おわりに

本研究では屋内の動線推定システムを構成するための通過検知手法を検討し、複数の設定で、RSSI、位相それぞれを用いる解析手法における精度比較を行なった。結果として、RSSI を用いる手法には検知率の高さ、位相を用いる手法には誤検知率の低さという利点があることがわかった。今後は、RSSI と位相を組み合わせることでより精度の高い検知モジュールの構成を検討し、複数人環境での稼働やより複雑な移動（通過中に静止する、通過せずに引き返すなどの移動）の検知も可能なシステムを目指していく。また、検知モジュールを複数設置することで人物の動線推定を行うシステムの実装についても検討していく。

参考文献

- [1] Jansen, Bart, Frederik Temmermans, and Rudi Deklerck. "3D human pose recognition for home monitoring of elderly." 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE, 2007.
- [2] Ward, Jamie A., et al. "Activity recognition of assembly tasks using body-worn microphones and accelerometers." IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence 28.10 (2006): 1553-1567.
- [3] Yao, Lina, et al. "Compressive representation for device-free activity recognition with passive RFID signal strength." IEEE Transactions on Mobile Computing 17.2 (2017): 293-306.
- [4] Ruan, Wenjie, et al. "Device-free human localization and tracking with UHF passive RFID tags: A data-driven approach." Journal of Network and Computer Applications 104 (2018): 78-96.
- [5] Yang, Po, and Wenyan Wu. "Efficient particle filter localization algorithm in dense passive RFID tag environment." IEEE Transactions on Industrial Electronics 61.10 (2014): 5641-5651.
- [6] Impinj 入手先 (<https://www.impinj.com/>) (参照 2021-05-06).
- [7] Impinj Application Note - Low Level User Data Support 入手先 (<https://support.impinj.com/hc/en-us/articles/202755318-Application-Note-Low-Level-User-Data-Support>) (参照 2021-05-06).
- [8] Li, Xinyu, et al. "Online people tracking and identification with rfid and kinect." arXiv preprint arXiv:1702.03824 (2017).
- [9] Fu, Wenpeng, et al. "A Method of Multiple Dynamic Objects Identification and Localization Based on Laser and RFID." Sensors 20.14 (2020): 3948.
- [10] Shangguan, Longfei, et al. "STPP: Spatial-temporal phase profiling-based method for relative RFID tag localization." IEEE/ACM Transactions on Networking 25.1 (2016): 596-609.