

アクティブ RFID を用いたゲートシステムの開発 ～ リファレンスタグによる物体位置推定方式 ～

小西 勇介, 中尾 敏康, 田口 大悟

NEC インターネットシステム研究所

論文要旨: 我々は, 近年様々な領域で普及が進んでいる RFID を用いたゲートシステムの利便性を更に向上させるための機能として, タッチレス化に注目している. 本稿では, アクティブ RFID を用いたタッチレスゲートシステムの開発について, 環境に固定したアクティブ RFID タグ (リファレンスタグ) の受信データから検知対象の位置を推定する方式の詳細と, 提案方式による位置推定精度およびゲートを通過するヒトの検知精度を確認した評価実験について報告する.

Touch-less Gate System using Active RFID - Positioning Method with Reference Tags -

Yusuke KONISHI, Toshiyasu NAKAO and Daigo TAGUCHI

NEC Internet Systems Research Laboratories

ABSTRACT: “Touch-less” must be one of the most important function for gate systems in the near future. We developed a touch-less gate system using Active RFID. In this report, we describe the detail of our proposed positioning method with “reference tags” which are placed around the gate, the concept of our developed gate system, and the experimental results. The results show the proposed positioning method can estimate passing object’s position and the gate system can correctly detect “user tags” which are attached to the object.

1 はじめに

近年, 鉄道事業をはじめとして, オフィス / 工場 / 病院 / 学校など, 様々な領域で RFID (Radio Frequency IDentification) を用いたゲートシステムの普及が進んでいる. このような背景の中, 我々は, ゲートシステムの利便性を更に向上させるための機能として, タッチレス化に注目している. タッチレス化とは, 近距離無線通信^{*1}を利用して, リーダにタグをかざす等の特別な操作を不要にすることである. ゲートシステムのタッチレス化により, 例えば, 以下のようなサービスが実現できる.

- チケット (タグ) をポケットに入れたまま通過できる 駅改札
- 消毒した両手を何にも触れさせることなく関係者のみが入室できる手術室
- 商品をカートに積んだままで精算されるレジ

このようなゲートシステムを実現するためには, 通過したヒトやモノだけを正確に検知できる必要がある. しかしながら, 近距離無線通信では, 通信範囲を正確に制御することが難しいという問題がある.

^{*1} 本稿では, 通信距離が数 m から十数 m の無線通信を指すものとする (例えば, 無線 LAN, Bluetooth, ZigBee, UHF 帯 RFID, 微弱無線通信, など)

そこで我々は, 近距離無線通信を用いて移動する検知対象の位置を把握するための技術開発に取り組んでいる. ゲート周辺の検知対象の位置を把握することで, 検知対象がゲートを通過したかどうかを正確に判定することを目的とする.

本稿では, アクティブ RFID を用いたタッチレスゲートシステムの開発について, リファレンスタグの受信データから検知対象の位置を推定する方式の詳細と, 提案方式による位置推定精度およびゲートを通過するヒトの検知精度を確認した評価実験について報告する.

2 アクティブ RFID を用いたゲートシステム

アクティブ RFID とは, 近距離無線通信を用いて, 電池を内蔵したタグから一定周期で送信される ID をリーダで読み取るシステムである. アクティブ RFID の通信距離は数 m から十数 m であり, リーダにタグをかざす等の特別な手順を必要とせずにタッチレスでタグの ID を読み取ることができる.

しかしながら, 通信距離の長いアクティブ RFID を用いてゲートシステムを実現するためには, ゲートの近くにいるヒトやモノは検知せずに, ゲートを通過しているヒトやモノだけを検知する必要がある (図 1). アクティブ RFID を用いてゲートを通過しているヒトやモノだけを正確に検知するための方法には, 以下の 2 つのアプローチがある.

1. 読み取りアンテナの設置位置や指向性を調整し, 通信

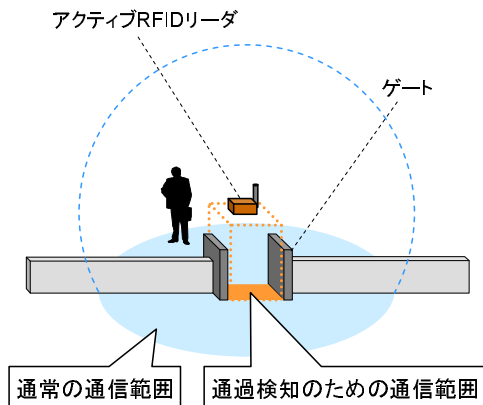


図1 アクティブRFIDの通信範囲

範囲を制御する

2. ヒトやモノの位置を把握し、ゲート内のヒトやモノだけを選択して検知する

しかしながら、アプローチ1では、ゲート周辺の環境変化やゲートを通過するヒトやモノの個体差などにより通信範囲を安定して保つのが難しく、かつ、通信範囲を制限することによりタグの読み取り性能が低下してしまう、という問題がある。

そこで我々は、環境に固定したアクティブRFIDタグ(リファレンスタグ)の受信データから検知対象の位置を推定する方式を提案し、アクティブRFIDを用いて通過するヒトやモノだけを正確に検知できるタッチレスゲートシステムを開発した(図2)。なお本稿では、リファレンスタグに対し、ヒトやモノの持つアクティブRFIDタグをユーザタグと呼ぶ。

本システムは、タグ判別、物体位置推定、および、IDと位置の結合、の3つの機能で構成される。

タグ判別 リーダで得られたタグの受信データから、読み取ったIDがユーザタグのものかリファレンスタグのものかを判別し、受信データを以降の処理に振り分ける

物体位置推定 リファレンスタグの受信データから環境内の物体位置を推定する

IDと位置の結合 ユーザタグの受信データから特定された物体のIDと、物体位置推定機能で推定された物体の位置を結合し、物体のIDと位置を出力する

以下、リファレンスタグによる物体位置推定方式について3章で詳細に説明する。また、IDと位置の結合については、4章で説明する。

3 リファレンスタグによる物体位置推定方式

3.1 リファレンスタグとは

アクティブRFIDシステムでは、電波の反射/回折/透過などによるマルチパス、ノートPCや他の電化製品から

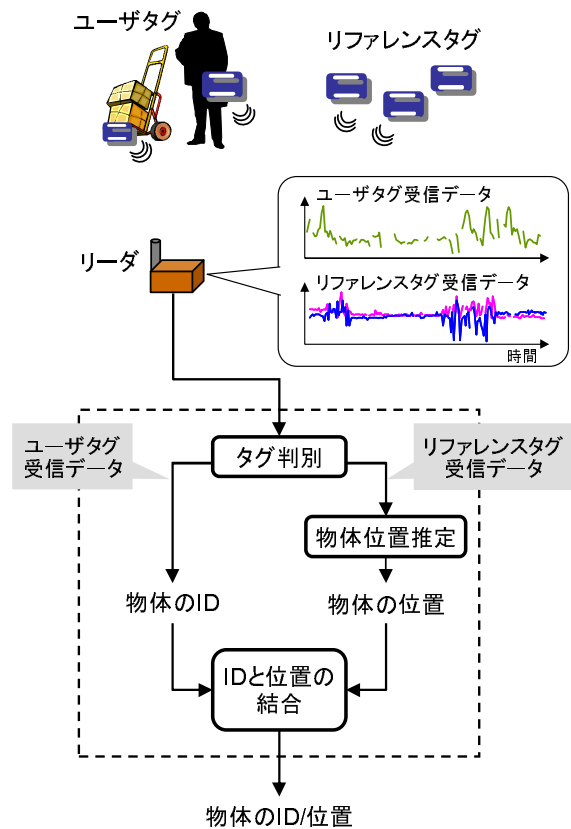


図2 システムの構成

発生する電波雑音などを原因とする電波環境変動の影響により、タグの受信状況が不安定になり、タグの正確な位置を特定することが難しいという問題がある。一方で、環境に固定したリファレンスタグの受信状況を観測する予備実験から、ヒトやモノの位置および動きに対して受信状況の変動に再現性があることが分かった。

このようなアクティブRFIDシステムの特徴を活かして、我々はこれまでに、検知エリア内の変動(例えばヒトやモノの位置や動き)を検出するために、検知エリアに固定したリファレンスタグの受信状況変化を利用する方式の検討を進めてきた^[1]。

本稿では、検知エリア内に検知対象が存在する時のリファレンスタグ受信データをあらかじめ取得しておき、観測されたリファレンスタグ受信データと比較することで、検知対象の位置を推定する方式を提案する。

提案するリファレンスタグによる物体位置推定方式の特長として以下の3点が挙げられる。

- 環境に設置したリーダーおよびタグのみを用いて、デバイスを持たない検知対象の位置を推定できる
- 屋内のようなマルチパス環境においても検知対象の位置を推定できる
- リファレンスタグとユーザタグに同じタグを用いるため、アクティブRFIDシステムだけで実現できる

3.2 物体位置推定方式

まず、本方式で利用するアクティブ RFID リーダは、タグから受信する電波の強度（以降受信強度と呼ぶ）を ID と同時に取得できるものとする。

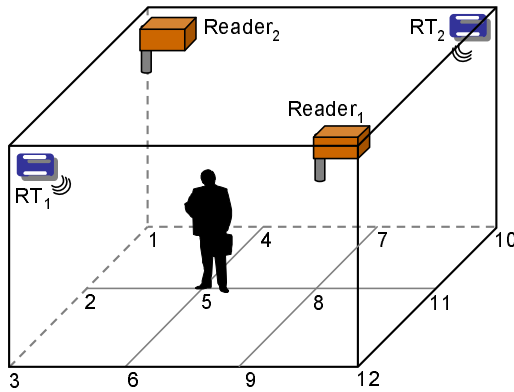
検知エリア内には、アクティブ RFID リーダが a 台 ($Reader_1, Reader_2, \dots, Reader_a$)、および、リファレンスタグが b 個 (RT_1, RT_2, \dots, RT_b) 設置されているとする。また、各リーダで取得される各リファレンスタグの受信強度 ($a \times b$ 個) を要素とする $a \times b$ 次元ベクトルを特徴ベクトルと呼ぶ。

以下では、事前に取得された検知エリア内のある位置に検知対象が存在するときの特徴ベクトルを基準特徴ベクトル、位置推定時に取得される特徴ベクトルを観測特徴ベクトルとし、基準特徴ベクトルと観測特徴ベクトルを比較して検知対象の位置を推定する方式について説明する。

3.2.1 基準特徴ベクトルの取得

基準特徴ベクトルを取得する位置として、検知エリア内の位置を c 点 ($pos_1, pos_2, \dots, pos_c$) 選択する。各位置に検知対象が存在するときに取得される基準特徴ベクトルを、位置と対応付けてあらかじめ記録しておく。

図 3 に、検知エリアにアクティブ RFID リーダを 2 台 ($Reader_1, Reader_2$)、および、リファレンスタグを 2 個 (RT_1, RT_2) 設置し、位置 pos_k ($k = 1, 2, \dots, 12$) に検知対象であるヒトがいるときに取得された基準特徴ベクトルの具体例を示す。図 3 では、 $Reader_1$ で取得された RT_1 の受信強度を「 $Reader_1 RT_1$ 」と表す。



取得された基準特徴ベクトル

位置	リファレンスタグ受信強度			
	Reader ₁ RT ₁	Reader ₁ RT ₂	Reader ₂ RT ₁	Reader ₂ RT ₂
pos ₁	110	180	165	205
pos ₂	135	95	240	230
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
pos ₁₂	201	220	120	98

図 3 基準特徴ベクトルの具体例

3.2.2 パターンマッチング法

基準特徴ベクトルと観測特徴ベクトルを比較して検知対象の位置を推定するために、パターンマッチング法を用いる。ここでは、基準特徴ベクトルと観測特徴ベクトルの類似度を評価するために、ユークリッド距離を用いる方法について説明する。

基準特徴ベクトルの要素のうち、位置 pos_k に検知対象が存在したときにリーダ $Reader_i$ で取得されたリファレンスタグ RT_j の受信強度を $pre_{k,i,j}$ とする。また、時刻 t に取得された観測特徴ベクトルの要素のうち、リーダ $Reader_i$ で取得されたリファレンスタグ RT_j の受信強度を $rcv_{t,i,j}$ とする。このとき、位置 pos_k に検知対象が存在したときの基準特徴ベクトルと、時刻 t に取得された観測特徴ベクトルのユークリッド距離 $dist(t, k)$ は、式 1 のように定義できる。

$$dist(t, k) = \sqrt{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (rcv_{t,i,j} - pre_{k,i,j})^2} \quad (1)$$

全位置 ($k = 1, 2, \dots, c$) の中で、式 1 を用いて算出した $dist(t, k)$ が最小になる位置を、時刻 t における検知対象の位置推定結果とする。

3.2.3 ベイズフィルタ

前項で説明したユークリッド距離を用いたパターンマッチング法を適用したシステムを実装した上で予備実験を行った結果、位置推定に誤差が発生しやすいことが分かった。そこで、本システムでは、ユークリッド距離を用いたパターンマッチング法に、位置推定誤差を低減するためにベイズフィルタ^[2]を適用する。

ベイズフィルタとは、誤差を含んだ観測量からシステムの状態を確率的に推定する手法の一つであり、センサフュージョンの分野などで広く使われている。本システムでは、ベイズフィルタを利用して、観測量（リファレンスタグの受信データ）からシステムの状態（物体の位置）を推定する。本システムでは、位置と時間を離散化させたベイズフィルタを用いる。

まず、時刻 t において検知対象が位置 pos_k に存在する確率を $p(t, k)$ 、時刻 $t - 1$ に位置 $pos_{k'}$ に存在した検知対象が時刻 t に位置 pos_k に移動する確率（システムダイナミクス）を $dyn(k, k')$ 、検知対象が位置 pos_k にあるときにリファレンスタグの受信強度 $rcv_{t,i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, a$, $j = 1, 2, \dots, b$) が得られる確率（知覚モデル）を $sens(t, k)$ とする。このとき、時刻 t における確率 $p(t, k)$ の計算は、式 2 で表される。

$$p(t, k) = \alpha_t sens(t, k) \sum_{k'=1}^c dyn(k, k') p(t-1, k') \quad (2)$$

ここで、 α_t は、確率 $p(t, k)$ の全位置 ($k = 1, 2, \dots, c$) についての総和を 1 にするための正規化係数である。

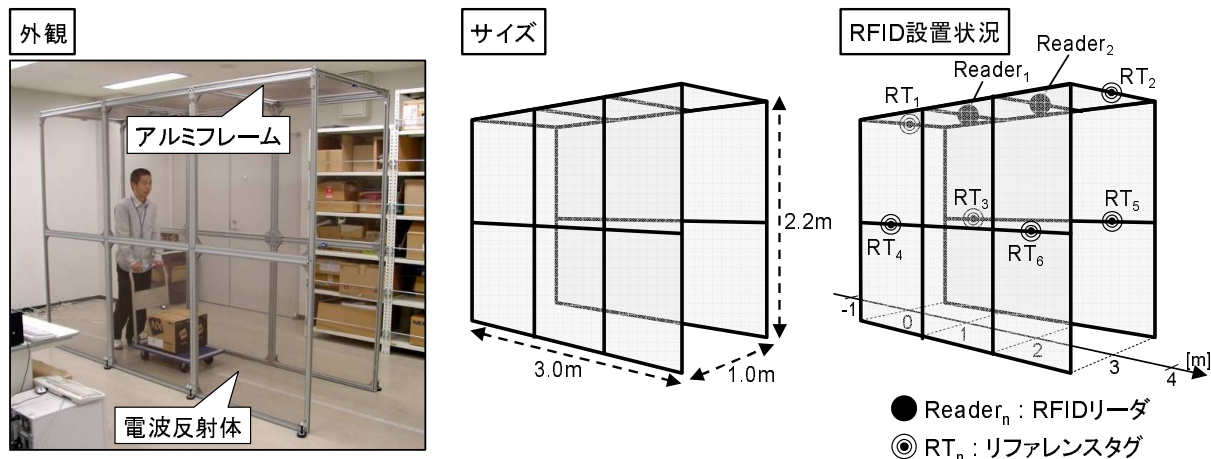


図4 ゲートのハードウェア構成

式2の計算を時間ステップ毎に逐次行うことにより、確率 $p(t, k)$ を求めることができる。さらに、全位置 ($k = 1, 2, \dots, c$) の中で確率 $p(t, k)$ が最大になる位置を、検知対象の位置推定結果とすることができる。

このようなベイズフィルタでは、システムダイナミクス $dyn(k, k')$ 、および、知覚モデル $sens(t, k)$ を目的に合わせて設計することによって、ユークリッド距離を用いたパターンマッチング法の場合に比べて位置推定誤差を低減することができる。本システムでは、システムダイナミクスとしてヒトの移動できる最大速度を制約するモデル、知覚モデルとして基準特徴ベクトルと観測特徴ベクトルのユークリッド距離が小さいほど確率が大きくなるようなモデルを設計し、実装した。

4 実装

開発したゲートシステムの実装について説明する。

物体位置推定機能については3章で既に説明したので、ここでは、ハードウェア構成と、IDと位置の結合機能について説明する。

4.1 ハードウェア構成

本提案で構築したゲートを、図4に示す。

図4左に示したように、トンネル型のゲート外枠はアルミ製のパイプフレームで製作し、側面および天井部分にはナイロンメッシュに銀をコーティングした電波反射体を張った。電波反射体を張ることによって、ゲート周辺の環境変化がゲート内の電波環境へ与える影響を軽減する効果が得られる。図4中に示したように、ゲートのサイズは、幅1.0m、高さ2.2m、奥行き3.0mである。

本システムでは、図4右に示したように、ゲート内にRFIDリーダを2台およびリファレンスタグを6個設置し、アクティブRFIDのタグを持ってゲートを通過するヒトを検知する。

使用したアクティブRFIDシステムの仕様を表1に示

表1 利用したアクティブRFIDシステムの仕様

アクティブRFIDリーダ (キュービックアイディ社: LAS-300R)	
タグ識別個数	最大50個/秒
外部IF	RS-232C/LAN(10BASE-T)
受信方式	シングルスーパーヘテロダイン方式
受信周波数	315.1MHz
受信距離	TYP 7m
外形寸法	152.0×116.9×30.0 [mm]
その他	タグごとに受信強度を256段階で出力

アクティブRFIDタグ (キュービックアイディ社: LAS-300T)	
送信ID長	32bit
送信間隔	0.2秒, 0.5秒, 1秒, 3秒, 5秒, 7秒, 10秒, 15秒
変調方式	FSK
送信周波数	315.1MHz
送信出力	微弱電波 (500μV/m以下 3m法)
アンテナ	ボタン電池ケース兼用型
外形寸法	45.5×38.0×10.0 [mm]

す。ただし、リファレンスタグ受信データの取得間隔が0.5秒(周波数2Hz)、ユーザタグ受信データの取得間隔が1秒(周波数1Hz)となるように各タグを設定して使用した。

なお、以降の説明における位置座標は、図4右に示した座標軸を用いて1次元の座標値で表現するものとする。

4.2 物体のIDと位置の結合

リファレンスタグから検知対象の位置が推定できても、その検知対象が持つユーザタグのIDが分からなければ、ゲートを通過するヒトやモノの特定はできない。そこで本システムでは、以下のような手順で、ユーザタグの受信データから特定されたIDと、リファレンスタグの受信データから推定された物体位置を結合する。

1. ユーザタグの受信強度に閾値を設定し、受信強度が大きいユーザタグだけを抽出する
2. 抽出されたユーザタグはゲートの近くにいと判定する
3. リファレンスタグから推定された物体位置がゲート内のとき、ゲートの近くにいと判定されたユーザタグの ID と推定された位置を結合する

上記のような ID と位置の結合方法を適用したシステムを実装したが、これまでの実験では、ID と位置を正確に結合できない場合があることが分かっている。方式の改良は今後の課題である。

5 評価実験

ゲートをヒトが通過する場合の、提案方式による位置推定の精度、および、通過するユーザの検知精度を評価するための実験を行った。

本評価実験では、座標軸上の -1m から 4m までを 0.1m 間隔で区切った点に対応する全 51 点を $pos_1, pos_2, \dots, pos_{51}$ とした。

5.1 基準特徴ベクトルの取得

基準特徴ベクトルの要素であるリファレンスタグ受信強度値 $pre_{k,i,j}$ は、位置 pos_k でヒトが 10 秒間静止したときにリーダ $Reader_i$ で取得されるリファレンスタグ RT_j の受信強度値 20 サンプル (10 秒 \times 2Hz) を平均した値とした。

次節以降で説明する実験に使用した全 12 次元 (リーダ 2 台 \times リファレンスタグ 6 個) の基準特徴ベクトルの要素のうち、リーダ $Reader_1$ と $Reader_2$ で取得されたリファレンスタグ RT_1 と RT_2 に関する 4 次元 (リーダ 2 台 \times リファレンスタグ 2 個) の受信強度値を、基準特徴ベクトルの例として図 5 に示す。

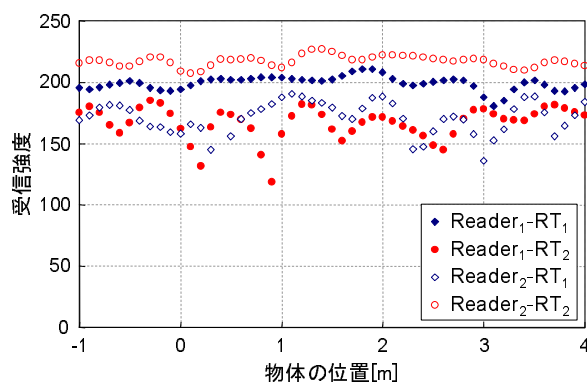


図 5 取得された基準特徴ベクトルの例

5.2 静止状態での位置推定精度

リファレンスタグによる物体位置推定方式の精度を評価するために、静止したヒトの位置を推定する実験を行った。座標軸上の -1m から 4m までを 0.5m 間隔で区切った 11 点について、各点で 100 秒間静止した際の位置推定結

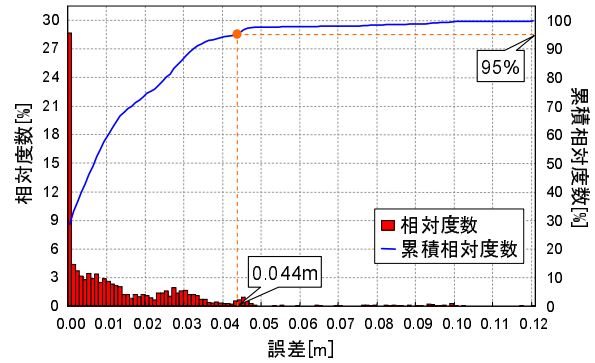


図 6 誤差の相対度数分布と累積相対度数分布

果 200 サンプル (100 秒 \times 2Hz) を取得した。11 点で 200 サンプルずつ取得された計 2200 サンプルの位置推定誤差を集計し、誤差の相対度数分布と累積相対度数分布を作成した。結果を図 6 に示す。

図 6 から、位置推定結果のうち 95% が誤差 4.4cm 以内に収まっていることが分かる。これは、パターンデータの取得間隔 (10cm) とほぼ同程度の分解能で位置が推定できていることを示している。

5.3 移動する物体の位置推定

リファレンスタグによる物体位置推定方式により移動する物体の位置を推定できることを確認するために、ゲートを通過する (移動する) ヒトの位置を推定する実験を行った。実験は下記の要領で行った。

1. 座標軸上の -1m の位置で静止した状態から計測を開始する
2. 適当なタイミングで座標軸に沿って + の方向へ移動を開始する
3. 座標軸上の 4m の位置に到着したら立ち止まり、その場で静止する
4. 静止した状態でしばらく待機し計測を終了する

また、座標軸上の -1m の位置から出発する時刻、0m の位置を通過する時刻、3m の位置を通過する時刻、4m の位置に到着する時刻、の計 4 つの時刻をストップウォッチで計測し、ヒトの位置の真値とした。実験結果を図 7 に示す。

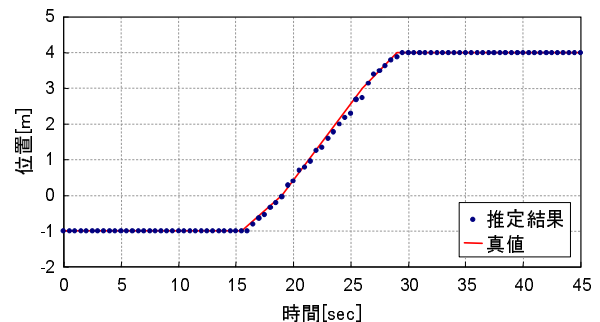


図 7 移動する物体の位置推定結果

図7に示したように、ゲートの±1m外側および内側の全域において、ゲートを通するヒトの位置を正しく推定できることが分かった。

5.4 ゲートを通するヒトの検知

ユーザタグの受信データから特定されたIDをリファレンスタグから推定された位置と結合することによって、ゲートを通するヒトを正確に検知できることを確認するために、ユーザタグを持ったヒトがゲートを通する実験を行った。実験は下記の要領で行った。

1. 事前に4つのユーザタグ(A,B,C,D)を、図8に示した台上に置いておく
2. 計測を開始する
3. 適当なタイミングで、ヒトが4つのユーザタグのうち



図8 ユーザタグの置き場所

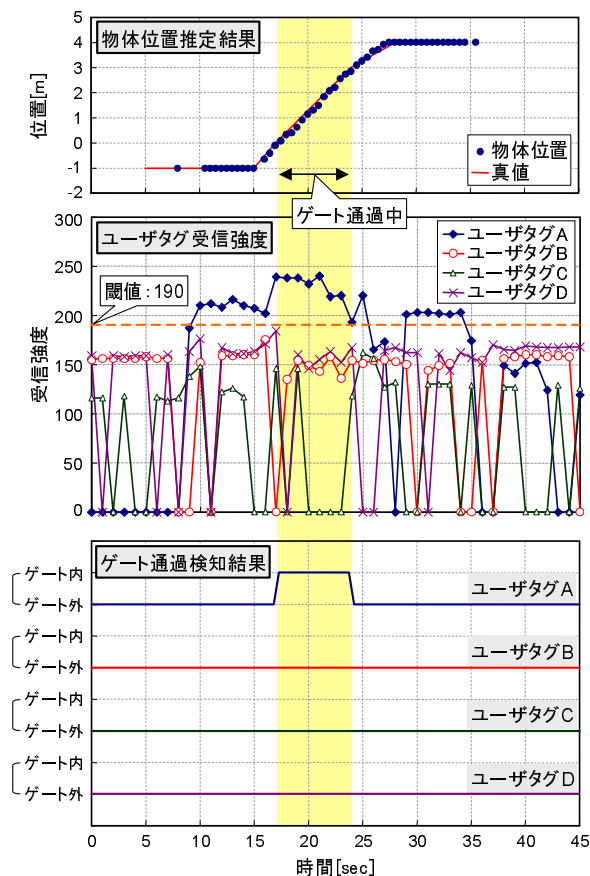


図9 ゲートを通するヒトの検知結果

ユーザタグAのみを台上から取り、座標軸上の-1mの位置に移動してその場でしばらく静止する

4. 適当なタイミングで、座標軸上の-1mの位置から座標軸に沿って+の方向へ移動する
5. 座標軸上の4mの位置に到着したら立ち止まり、その場でしばらく静止する
6. 適当なタイミングでゲートから離れて計測を終了する

また、座標軸上の-1mの位置に到着した時刻、-1mの位置から出発する時刻、0mの位置を通する時刻、3mの位置を通する時刻、4mの位置に到着する時刻、および4mの位置から離れた時刻、の計6つの時刻をストップウォッチで計測し、ヒトの位置の真値とした。実験結果を図9に示す。

まず、図9上から、リファレンスタグによる物体位置推定によって、ゲートを通するヒトの位置が正しく推定できていることが分かる。また、図9中から、ユーザタグの受信強度に閾値(本実験では190とした)を設定することにより、ゲートの近くにあるユーザタグのみを正しく抽出できていることが分かる。これらのリファレンスタグから推定された物体位置と、ユーザタグから特定されたIDを結合した結果、図9下に示したように、ゲートを通しているユーザタグのみを正確に検知できることが分かった。

6 おわりに

本稿では、アクティブRFIDを用いたゲートシステムの開発について、リファレンスタグによる物体位置推定方式、および、その実装と評価について報告した。本提案方式は、アクティブRFIDに限らず、無線LANやZigBeeなどの無線通信技術への適用も可能であると考えている。今後、複数物体の位置推定、直線上の位置推定から平面や空間内での位置推定への拡張、ユーザタグから得られる物体のIDと推定された位置の結合方式の改良、などの検討を進めていく。

参考文献

- [1] 小西, 中尾, 田口, “リファレンスタグ”を用いたアクティブRFID検知精度向上方式, FIT2005 情報科学技術レターズ, pp.311-314, 2005
- [2] D. Fox, J. Hightower, L. Liao, D. Schulz and G. Borriello, Bayesian Filtering for Location Estimation, IEEE Pervasive Computing, 2(3), pp.24-33, 2003
- [3] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, Proc. IEEE Infocom, 2000(2), pp.775-784, 2000
- [4] 小川, 吉野, 清水, 屋内における無線タグを用いた学習型位置推定法, 情処研究報告, 2004-UBI-5, pp.31-38, 2004
- [5] 中尾, 谷口, 稲葉, 久保田, Bluetooth™を用いたタッチレスゲートシステム, 情処研究報告, 2002-MBL-23, pp.29-36, 2002