

# RFID 情報システムにおけるシステムレベルでの信頼性向上

萩原 大輔<sup>†</sup> 井上 創造<sup>††</sup> 安浦 寛人<sup>††</sup>

本論文では、RFID (Radio Frequency Identification) を用いて現実世界の物品や人を識別するシステムにおいて、個々のデバイスの性能に頼るのではなく、ネットワークを介したシステム全体で RFID タグの認識の信頼性を確保する方法を提案する。実際に RFID タグの認識の観測実験を行い、RFID タグを固定している場合や、RFID タグが移動する場合に、時間、速度、電波の到達距離、RFID タグの状況、リーダを設置している環境といった様々な要因によって認識誤りが起こり、これがシステムの信頼性の低下につながることを確認した。また、シミュレーションによって誤りの数、移動の長さ、リーダの個数を変化させた場合の提案手法の効果を示す。

## System Level Reliability in RFID Information Systems

DAISUKE HAGIWARA,<sup>†</sup> SOZO INOUE<sup>††</sup> and HIROTO YASUURA<sup>††</sup>

In this paper, we propose an approach to increase the reliability of RFID (Radio Frequency Identification), not relying on the performance of each devices, but relying on a mechanism of entire networked system, which manages objects and/or people in the real world with RFID tags. We identified there exist many factors to reduce the accurate identifications of RFID tags, which results in the reduction of the total-system reliability. Moreover, we show the effect of our approach in diverse parameters such as the number of misidentifications, the length of transportations, the number of RFID readers.

### 1. はじめに

現在、移動の激しい物品の管理や流通管理のようにトレーサビリティが求められる場所を中心に、RFID (Radio Frequency Identification)<sup>1),2)</sup> 情報システムが導入され始めている<sup>3),4)</sup>。

しかし、RFID は無線通信に基づくため、電波の干渉によってリーダが RFID の認識に失敗したり、利用者が RFID を故意に認識させないというように、通信の品質や認識の確実性を保つことが難しいことが多々ある。RFID の認識の失敗によって、現実世界の情報を正確に情報システムに対応づけることができず、システム全体の信頼性が失われ、大きな損害を受けることにもなりうる。たとえば、図書館では、在庫の帳簿に記載された場所とは異なる場所に図書があって正確な管理ができなくなったり、空港では、ロスト・バゲッジが増大したり、スーパーマーケットでは、正しい精算ができなくなったりする。

上記のような問題に対して、単純にリーダにおける

認識の確実性を上げることを考えるのではなく、リーダの性能は変わらなくてもシステム全体で何らかの工夫をすることで、システムの信頼性を向上させるという考え方が必要である。本論文では、RFID を用いた情報システムにおける信頼性の問題について、実環境での観測実験を行い、複数のリーダが計算機ネットワークにつながっていることを利用してシステム全体で RFID の認識の信頼性を向上させる方法<sup>5)</sup> についてシミュレーションによる評価を行う。提案手法の基本概念は、現実世界の人やモノがもついくつかの制約を、仮想世界に対して利用することである。現実世界の情報を RFID や様々なセンサを利用して仮想世界に効果的に取り込むことで、取り込んだセンサデータを補完し、修正する。上記の概念によって、現実世界の情報と仮想世界の情報が食い違うことなく、情報システムの信頼性を保つことが可能になる。

#### 1.1 RFID を用いた情報システムの信頼性

ここでは、情報システムの信頼性を、現実世界における種々の実体や事象を取り扱う情報システムが、現実世界での実体の変化や事象の発生に対応する情報を確実に取得し、正確に情報システムの情報を更新することができる性質とする。本論文では、情報取得の手段が RFID であり、事象を人や物体の位置の移動と

<sup>†</sup> ソニーグローバルソリューションズ株式会社

Sony Global Solutions Corporation

<sup>††</sup> 九州大学システム LSI 研究センター

System LSI Research Center, Kyushu University

する。

信頼性を数量的に表す尺度として、ここでは再現率を定義する。再現率とは、人や物体が移動したときに発生した情報に対する取得できた情報が占める割合である。

## 1.2 関連研究

RFID 情報システムの応用は、RFID タグのメモリに識別子を記憶させ、物品を効率良く管理するために用いられ、実際に航空手荷物の管理<sup>6)</sup>、食品流通の管理<sup>7)</sup>、衣料品店での衣料ディスプレイ<sup>8)</sup>、図書館での図書管理<sup>9)</sup>、家電リサイクル管理<sup>10)</sup>、イベント会場管理<sup>11)</sup> のように幅広い応用を持つ。しかしこれらの応用に関する研究では、認識が失敗することによるシステムの信頼性の低下にシステムレベルで議論するものはない。

一方ユビキタスコンピューティングの分野では、以下に述べるように、位置情報システムや現実世界の状況(コンテキスト)の信頼性に関する研究が存在する。しかしこれらは RFID 情報システムのように認識したかしていないかという 2 つの認識結果ではなく、あいまいな値をセンサが返してくる状況を想定している部分が本論文の視点とは異なる。

文献 14) では、GPS による物体の移動軌跡データを分散して管理する分散型のセンサデータベースにおいて、センサのローカルなデータベースとサーバのデータベース間で生じるデータの欠損や遅着に対して、物体が移動するときの物理的制約から、物体の将来の位置を過去の移動軌跡データから推測することを提案している。この方法は、物体の物理制約を利用するという意味では我々の概念と合致するが、RFID はセンサに対応するリーダが読み取る値そのものに欠損があることを想定する点が我々の手法の特徴である。

文献 15) においては、種々の信頼性を持つセンサが数多く存在するような環境で、複数のセンサからの入力を集約して物体の正確な位置を検出する方法を提案している。ここでは地図の知識および、RFID をはじめとするあらかじめ信頼性が高いことが分かるセンサの入力を優先するような仕組みを提供している。しかしこの文献は、センサの認識誤りがシステムの致命的な信頼性低下につながることは想定していない。RFID 情報システムにおいては、空港の手荷物管理のように、認識誤りが信頼性低下につながることもあるためそれを改善する方法が必要となる。また、この文献は RFID を信頼性が高いものと位置づけているが、RFID は認識できた場合には精度が高いが認識できない場合にはなにも分からないので、この意味で RFID

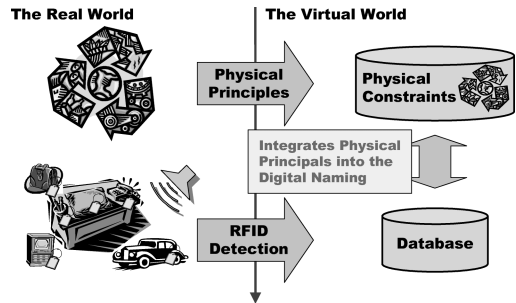


図 1 信頼性向上のためのアプローチ  
Fig.1 The approach for reliability.

の信頼性は低いことが考えられる。

文献 16) では、コンテキストをオントロジ表記言語 OWL を用いて記述する方法を提案しているが、RFID を含む種々のセンサの情報をセンサの信頼性を付記して表記する方法を導入している。しかしこの文献は表記法のみ提案であり、本論文のように信頼性を向上させる方法を提案するにはいたっていない。

## 1.3 現実世界の物理制約とその利用

RFID を用いた情報システムの信頼性を向上させるためには、リーダや RFID タグの性能を上げるだけでなく、システム全体で工夫をすることも重要な要素となる。我々は、RFID の認識の失敗による現実世界と仮想世界の食い違い(以下、誤り)を、システム全体で検出することに焦点をあてる。検出された誤りは、その後の自動または手動による修正により再現率を向上させる必要があるが、誤りを修正する方法やコスト、要求される効果は応用によって異なることが考えられる。本論文では、その前の段階として誤り検出の方法を提案しその効果を検証することに焦点を置く。

信頼性向上のためのアプローチの基本概念を図 1 に示す。まず、人やモノの物理的原理に基づいた現実世界の制約(以下、物理制約)を、仮想世界のデータベースに準備として蓄えておく。さらに、RFID によって得られたデータと現実世界の物理制約との一貫性を照合することで、誤り検出が達成される。現実世界の物理制約には、たとえば人やモノの 1. 重量、2. 視覚的な形状や挙動、3. 場所、4. 移動を制限する地形があげられる。

文献 5) では、現実世界の物理制約をいくつかあげたが、本論文では中でも以下の制約を利用する。

- 現実世界の人やモノには、それぞれ通過できる経路や通過してはいけない経路といった、物体の経路における規則(以下、経路ルール)が存在する。たとえば、流通センターでは、物品はベルトコンベヤーに乗って決められた経路を通り、スーパー

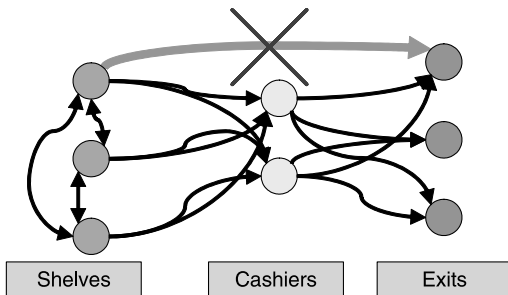


図 2 有向グラフで表現された経路ルールの例  
Fig. 2 An example of route constraints.

マーケットでは、陳列棚からとられた商品はレジを通して精算されてから、出口を通る。システムが経路ルールを知っていれば、経路ルールに矛盾した経路の記録を何らかの誤りだと仮定することができる。

以下では、システムのアーキテクチャとして、基本的な構成を仮定する。つまり、リーダがネットワークにつながっていて、人やモノの情報、および現実世界の物理制約を格納するデータベースを持つサーバが存在する。経路ルール  $D(V, A)$  は、各リーダをノード  $v \in V$  とし、RFID タグが直接移動できるノード間を弧  $a \in A$  とする有向グラフである。システムは、経路ルールとして事前にサーバに登録しておく。図 2 に有向グラフで表現された経路ルールの例を示す。

グラフ  $D(V, A)$  中のパスとは、 $D(V, A)$  中のノードの系列  $\langle v_1, v_2, \dots, v_n \rangle$  ( $v_1, v_2, \dots, v_n \in V$ ) で、任意の  $i < n$  に対して、 $(v_i, v_{i+1}) \in A$  を満たすものをいう。RFID タグ  $b$  が実際に移動した経路を示す、グラフ  $D(V, A)$  のパス  $X = \langle r_{b_1}, \dots, r_{b_k} \rangle$  をリアルパスと呼ぶ。リアルパスの長さ  $|X|$  は  $k$  で定義される。

RFID タグ  $b$  が実際に移動したときに、 $b$  を認識したリーダのログをノード系列  $S = \langle r_{s_1}, \dots, r_{s_l} \rangle$  と呼ぶ。ノード系列の長さ  $|S|$  は  $l$  で定義される。ただし、系列  $S$  に含まれる任意のノード  $r_{s_i}$  はリアルパス  $X$  に含まれるノードのいずれかであり、系列  $S$  に含まれるノード数はリアルパスに含まれるノード数以下である、つまり、 $l \leq k$  である。系列  $S$  に誤りが存在するとは、系列  $S$  とリアルパス  $X$  を系列として比較したときに両者が異なる場合をいう。この場合、再現率は  $|S|/|X|$  で定義される。

システムの動作は以下ようになる。

各リーダは、RFID タグを認識した際に、リーダ自体の ID と認識した RFID タグの ID を送信する。さらに、リーダとつながった端末やユーザ・インタフェー

スに、サーバから報告される警告やエラーメッセージを表示する。

サーバは、リーダ  $r$  からの ID  $j$  の認識信号  $\langle r, j \rangle$  を受け取るたびに、以下のように動作する。

入力：リーダ  $r$  からの ID  $j$  の認識信号  $\langle r, j \rangle$ 。

出力：認識ミスが検出されたかどうか。

アルゴリズム：

- (1) スタック  $T$  が存在しなければ用意する。
- (2) 受信した  $\langle r, j \rangle$  について、スタック  $T$  から RFID タグ  $j$  についての最も最近の信号の履歴を取り出し見つければこれを  $\langle r', j \rangle$  とする。経路ルール  $D(V, A)$  の中で、リーダ  $r'$  に対応するノードからリーダ  $r$  に対応するノードへの弧が存在しない場合、認識ミスを報告する。
- (3)  $\langle r, j \rangle$  をスタック  $T$  に追加して終了。

上記のように、現実世界の物理制約を利用することで、システムは以下のように信頼性を向上させることができる。RFID タグをどのリーダが認識したかの履歴をサーバに記録していくとする。これにより、各 RFID タグに対する履歴が登録された経路ルールに違反すると、何らかの例外が生じていることが検知できる。

以下の構成は次のとおりである。2 章で実際の環境における RFID タグの認識を観測する。3 章でシミュレーションにより提案手法の効果を調べる。4 章で本論文をまとめる。

## 2. RFID 情報システムにおける RFID タグの認識の観測実験

1.3 節で述べたような信頼性向上の手法は、現実の RFID 情報システムの信頼性が低いほど重要性を増す。しかし、文献 6) のような既存の文献は、リーダのアンテナに高コストの改良や運用上の工夫を施した後の RFID タグの認識の信頼性のみを公表しており、本論文が扱うような、システムレベルで効率の良い信頼性向上の手法を評価するための基礎データとはなりえない。

そこで本論文では、リーダのアンテナや運用上の工夫を施さない RFID 情報システムにおいて実際にリーダが RFID タグの認識にどれだけ失敗するかを調べるために、研究室にいくつかのリーダを設置して簡単な RFID 情報システムを構築し、RFID タグの反応を観測する。計算機や金属性の物品が数多く存在するような環境で、RFID タグが置かれている、もしくは移動する場合に、リーダが実際に RFID タグの認識に

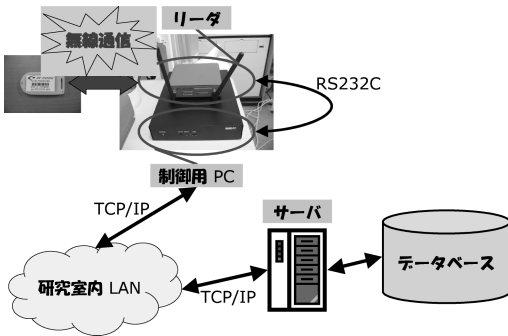


図3 構築した RFID 情報システムの構成  
Fig. 3 The composition of the RFID system.

どれだけ失敗するかを調査し、どういった環境、状況において RFID タグの認識に失敗しやすいかを考察する。

### 2.1 実験環境

本実験では、研究室および廊下に 9 つのリーダを設置する (図 6 の各ノードに相当)。

各リーダは RS-232C ケーブルでそれぞれ制御 PC に接続されていて、認識した RFID タグから受信したデータを制御 PC に送信する。RFID タグはアクティブタグで、自身の ID のみを発信する。制御 PC は、研究室内の LAN を通じてサーバにつながっていて、リーダから受信した RFID タグの ID、および ID を受信した時間、自身の MAC アドレスをサーバに送信する。ID を受信した時間を RFID タグの認識時間とする。サーバは制御 PC から受信したデータ (RFID タグの ID、認識時間、制御 PC の MAC アドレス) をデータベースに格納する。制御 PC とサーバ間の通信は TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) で行われる。各制御 PC とサーバの時間はタイムサーバを使って同期をとる。構築した RFID 情報システムの構成を図 3 に示す。

RFID タグとリーダの仕様、および制御 PC、サーバの環境は以下のとおりである。

#### [ RFID タグ ]

スパイダータグ (RF-CODE 社製アクティブタグ)、  
発振周波数: 303.825 MHz  $\pm$  200 KHz, 発信間隔:  
約 7.0 秒

#### [ リーダ ]

スパイダーリーダ, 送信レート: 19200 bps, 受信周  
波数: 303.825 MHz

#### [ 制御用 PC ]

JMNet WAKE-PC, プロセッサ: Transmeta Cru-  
soe TM5800, 866 MHz, OS: RedHat Linux 9, メ  
モリ: 512 MB

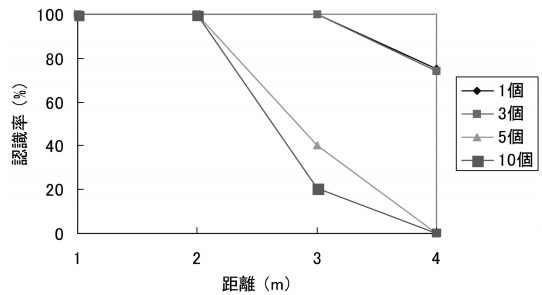


図4 廊下における RFID タグの認識率  
Fig. 4 Identification rate in the corridor.

### [ サーバ ]

DELL Dimension 8200, プロセッサ: Intel(R)  
Pentium(R) 4, 1.7 GHz, OS: RedHat Linux 9, メ  
モリ: 1.0 GB

本実験では、RFID タグを固定した場合と RFID タグを移動させた場合の 2 種類の観測を行う。

### 2.2 RFID タグを固定した場合の実験

電池の残量の違いのために、RFID タグによって発信間隔には多少のばらつきがある。まず 25 個の RFID タグに対して、ほぼ同じ発信間隔を持つ RFID タグを選定する。以下では、5 分間での RFID タグを測定した結果の発信回数 (46 回) に対する、実際の認識回数の割合を RFID タグの認識率として計算する。

まず、普段は人のいない、かつ計算機などが無い廊下に設置したリーダ (図 6 中の W3 のリーダ) に対して、1 つの RFID タグを同じ向き・高さに置き、リーダと RFID タグ間の直線距離を、1 m, 2 m, 3 m, 4 m と変化させて認識率がどう変化するかを調べる。それぞれの距離に対して、RFID タグの数を 1, 3, 5, 10 個と増やすことで、複数の RFID タグが同じ箇所にあることによる認識率の変化を調べる。ただし、複数個の RFID タグは隣接して並べて置く。

次に、人がいたり、計算機や金属性のものが数多く存在するような研究室に設置したリーダ (図 6 中の W7 のリーダ) に対して、廊下と同様の実験を行い、環境による認識率の変化を調べる。

廊下のリーダ (図 6 中の W3) における RFID タグの認識率とリーダ・RFID タグ間の距離の関係、および RFID タグを 1, 3, 5, 10 個と増やしたときの認識率の変化を図 4 に示す。

図 4 にあるように、RFID タグが 1 個、あるいは 3 個の場合は、3 m を超えると徐々に影響が出てきて、5 m になると認識されなくなった。RFID タグが 5 個、10 個になると、3 m 離れると認識率は激減し、4 m の時点でどの RFID タグも認識されなくなった。ここで

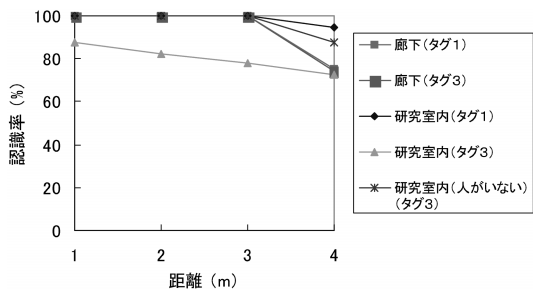


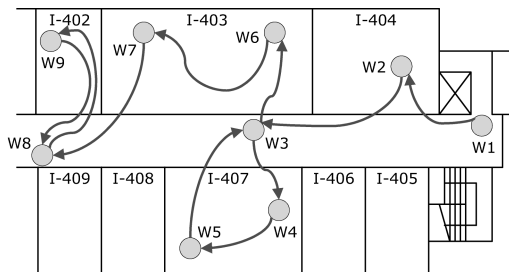
図5 研究室内と廊下における RFID タグの認識率の違い  
Fig. 5 Identification rate in the room and the corridor.

は個数を変更したこと以外は条件を変更していないことから、RFID タグの個数が増えると長い距離では認識されないことになる。これは、RFID タグの個数が増えるほど同じ周波数を用いたタグどうしの出力が相殺しあい、その結果それぞれの RFID の通信距離が伸びなくなるためだと考えられる。

次に、廊下における RFID タグの認識率と研究室内のリーダ（図 6 中の W7）における RFID タグの認識率の違いを図 5 に示す。

図 5 にあるように、RFID タグが 1 個の場合、廊下でも研究室でも 4m を超えると認識率が下がってくる。ただし、研究室内での認識率の方が、認識率の下がる割合は少ない。これは、廊下のほうが壁にはさまれていて、反射の影響が出やすいのではないかと考えられる。RFID タグが 3 個の場合、廊下では約 100% の認識率であった 1m の距離でも、研究室内での認識率が下がっている。しかし、研究室内でも人がいない場合だと、廊下での認識率と変わらない認識率になる。上記のことから、リーダや RFID タグの周りに人がいるだけで、RFID タグの認識率に影響が出ることが推測できる。

さらに、RFID タグそのものを種々の条件下において観測してみた。RFID タグを鞆の中に入れて置いたり、携帯電話と一緒に置いたりしてもほとんど影響はなかったが、RFID タグをアルミホイルに包んだ状態だと、リーダのすぐそばに置いても認識されなくなった。鞆のような金属でないものに包まれる場合や、金属でも一緒に置いてある程度の場合にはほとんど影響はないが、金属製のものに包まれると大きく影響される。また、テレビのそばにリーダを置いた場合、電源がついてないときには何の影響もないが、電源がつくだけで 1m の距離も認識されなくなる。ただし、アルミホイルで包んだ場合ほど影響が出るわけではなく、リーダのすぐそばに RFID タグを置いた場合には確実に認識される。



移動経路: W1→W2→W3→W4→W5→W3→W6→W7→W8→W9→W8

図 6 RFID タグの移動経路

Fig. 6 The route of RFID tags.

### 2.3 RFID タグを移動させた場合の実験

前節の観測で用いた RFID タグの 1 つを用いて、RFID タグを移動させた場合の観測を行った。RFID タグの移動は、1 人が RFID タグを持って実際に研究室内、廊下を歩くことで行った。移動経路については、図 6 にあるように W1 → W2 → W3 → W4 → W5 → W3 → W6 → W7 → W8 → W9 → W8 の順に移動した。

ただし、出発点である W1 のリーダには必ず RFID タグを認識させて移動するため、W2 以降のリーダでの認識履歴が評価の対象となる。各リーダにおいて、RFID タグが少なくとも 1 度認識されたという事象をイベントと呼ぶ。以下では、実際の移動経路を再現できた場合のイベント数に対する、各リーダが認識できたイベント数の割合を再現率として評価を行う。

以下の 5 つの条件で、図 6 の移動経路をそれぞれ 10 回ずつ試行し、再現率の平均を求めてそれぞれ比較する。

- 普通に歩いた場合（移動時間：約 1 分）
- ゆっくり歩いた場合（移動時間：約 1 分 30 秒）
- 速く歩いた場合（移動時間：約 30 秒）
- 鞆に入れて普通に歩いた場合（移動時間：約 1 分）
- 携帯電話と一緒に持って普通に歩いた場合（移動時間：約 1 分）

同じ条件の下では、RFID タグを持つ位置、移動する場所、速さは可能な限り同様の移動を繰り返した。完全に同じ移動をすることは現実には難しいが、現実には RFID 情報システムが使われる環境においても同様のばらつきが発生することを考えれば自然な設定であると考えられる。

RFID タグを持って、種々の速度や条件で歩いた結果の再現率を表 1 に示す。

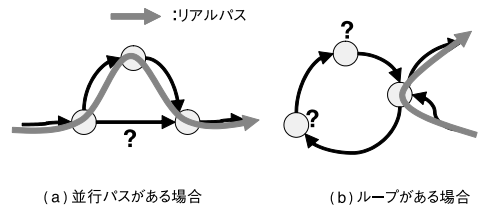
表 1 にあるように、普通に歩いた場合に比べて、ゆっくり歩いた場合の再現率は高く、速く歩いた場合の再現率は低くなっていることから、RFID タグの認識は

表 1 5つの条件下でのそれぞれにおける再現率  
Table 1 The recall rates in 5 conditions.

	全イベント数	認識できなかったイベントの平均数 (平均エラー数)	平均再現率 (%)
普通(約1分)	10	4.4	56
遅い(約1分30秒)	10	2.5	75
速い(約30秒)	10	6.3	37
鞆(約1分)	10	5.0	50
携帯電話(約1分)	10	7.0	30

移動の速さに影響されることが推測できる．ゆっくり歩いた場合の再現率でも 75%であることから，RFID タグが移動することだけで，RFID タグを確実に認識することは困難であることが推測できる．速く歩いた場合は約 30 秒で 1 回の移動が終わっているが，RFID タグの発信間隔が約 7.0 秒であることから，10 のイベントをすべて認識するには少なくとも約 70 秒は必要であるため，前提から再現率が低くなる．単純に考えても，RFID タグの発信間隔を短くする，もしくは移動の速さを制限するといった処置が必要となる．また，普通に歩いた場合でも，RFID タグを鞆の中に入れたり，携帯電話と一緒に持ったりすると，再現率は低くなることが分かる．表 1 に記されていないが，鞆の中に入れた場合と携帯電話と一緒に持った場合に関しては，普通に歩いた場合に比べて同時に複数のリーダで認識されることが少なかった．このことは，RFID タグから発信する電波の到達距離が短くなっていることが推測できる．各リーダにおいてイベントを認識できた割合を見てみると，W6, W8, W9 のリーダにおける RFID タグの認識の誤りが目立った．このことは，リーダからの距離が比較的遠い位置を歩いたことやリーダの近くを通る時間が比較的短いことが原因として考えられる．また，W8 のリーダの近くに設置されているタッチパネル型 PC も，W8 のリーダにおける認識の誤りの原因の 1 つであることが推測できる．

本実験で示されたように，RFID における無線通信は不安定であり，時間，環境，速度，距離，RFID タグの状況（輻輳や取り付けられる物体），人の有無といった様々なことが要因となっている．無線通信が不安定であることで，思いどおりのリーダで思いどおりの RFID タグを確実に認識することは困難である．RFID を単純に利用しているだけでは，現実世界でのモノの移動や状態の変化を情報システムに正しく反映させることは難しく，現実世界の情報と情報システムの情報に食い違いが生じることが改めて確認された．



(a) 並行パスがある場合 (b) ループがある場合

図 7 誤りを検出できない場合

Fig. 7 The cases of the failure of error detections.

### 3. 経路ルール利用のシミュレーション

本章では，経路ルールによる誤り検出が RFID 情報システムにどれだけ有効かをシミュレーション実験によって評価する．

経路ルールにより検出された誤りは，自動または手動による方法で修正される必要があるが，文献 5)，17) では，並行パスやループの存在や，リアルパスの始点や終点での誤りによって検出されない誤りが存在することが指摘されている．本シミュレーションでは，経路ルールによる誤りの検出もれがどの程度発生するかを解析することに焦点をおく．したがって本シミュレーションは，誤りの修正方法の選択のしかたによる影響を除去するために，検出された誤りに関しては理想的な誤り修正を施す．ここでいう理想的な誤り修正とは，誤りを修正する機能が，RFID タグが実際に移動した経路を示すリアルパスを知っていて，検出された誤りを含むイベント間とその間のリアルパスを比較することで，検出した誤りを修正することである．また並行パスとはノード系列の連続した 2 要素間に経路ルール  $D(V, A)$  における弧が存在するときに，弧とは別に存在するパスのことであり，ループとはノード系列のある要素を含む  $D(V, A)$  上の有向閉路のことであり．経路ルールに並行パスが存在する場合には，提案する誤り検出アルゴリズムではノード系列の連続した 2 要素間の弧と並行パスのうちどちらがリアルパスに含まれるかを判定できない場合がある（図 7(a)）．また，提案する誤り検出アルゴリズムではリアルパスがループを通るかどうかを判断できない場合がある（図 7(b)）．

#### 3.1 実験内容

シミュレーション実験は PHP 言語と PostgreSQL を用いた簡易プログラムを用いて行った．シミュレーションプログラムは，以下の手順で動作する．

入力： ノード数  $n$ ，弧数  $a$ ，リアルパスの長さ  $p$ ，誤りの数  $e$ ．

出力： 経路ルールを利用しない場合の再現率，経路ルールを利用した場合の再現率．

手続き：

- (1) 以下の手順でランダムに有向グラフ  $D(V, A)$  を作り、これを経路ルールとする：
  - (a) まず  $n$  個のノードを作りノード集合  $V$  に加える．
  - (b) 次に 2 つの乱数の組  $i, j (0 \leq i, j < n)$  を用意し、弧  $(i, j)$  が弧集合  $A$  に存在しなければこれを加える．
  - (c) (b) を  $A$  の要素数が  $a$  になるまで繰り返す．
- (2) 経路ルール  $D(V, A)$  のパスとなりうる長さ  $p$  のイベントの列をランダムに作る．この手順は、ランダムにノードを選び、このノードから出発するパスをランダムウォークにより選ぶ．パスの選び方によりイベントが  $p$  個に達しない場合は出発ノードを選びなおす．得られたイベントの列をリアルパスとする．
- (3) イベントの列の中で  $e$  個のイベントをランダムに削除する．この削除されたイベントを誤りと見なす．
- (4) (2) のイベント列に対する、(3) の結果のイベント列の大きさの割合を計算し、これを、経路ルールを利用しない場合の再現率とする．
- (5) 経路ルールと、1.3 節に示した誤り検出のアルゴリズムにより誤りを検出する．
- (6) リアルパスと比較することで検出された誤りを修正し、経路ルールを利用した場合の再現率を計算する．

上記のような簡易シミュレーションプログラムを用いて、経路ルールを利用しない場合 (Naive と呼ぶ) と経路ルールを利用する場合 (Improved と呼ぶ) の再現率をそれぞれ計算する．それぞれの再現率を比較することで、経路ルールによる誤り検出が RFID 情報システムにどれだけ有効かを評価する．

本実験では、以下の 3 つの条件における再現率の比較を示す．

- 誤りの数に対する再現率
  - 有向グラフのノード数：100 (固定)
  - 有向グラフの弧数：3,000, 5,000, 7,000 (3 パターン)
  - リアルパスの長さ：100 (固定)
  - 誤りの数：0 ~ 100 に変化 (パラメータ)
- リアルパスの長さに対する再現率
  - 有向グラフのノード数：100 (固定)
  - 有向グラフの弧数：1,000, 3,000, 5,000, 7,000 (4 パターン)

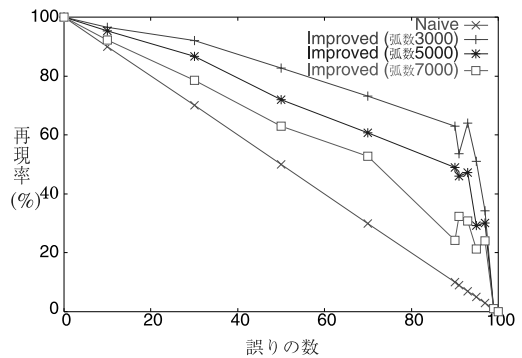


図 8 誤りの数に対する再現率

Fig. 8 The recall rates for each error number.

- リアルパスの長さ：5 ~ 1,000 に変化 (パラメータ)
- 誤りの数：リアルパスの長さの 60%
- 弧数に対する再現率
  - 有向グラフのノード数：100 (固定)
  - 有向グラフの弧数：200 ~ 9,000 に変化 (パラメータ)
  - リアルパスの長さ：10, 20, 50 (3 パターン)
  - 誤りの数：リアルパスの長さの 60%

それぞれの条件に対して、再現率の計算を 10 回試し、その平均値を経路ルールを利用した場合の再現率とし、経路ルールを利用しない場合の再現率と比較する．

### 3.2 実験結果

本節では、3.1 節で述べた 3 つの条件におけるそれぞれの再現率の比較を示す．

#### 3.2.1 誤りの数に対する再現率

誤りの数に対する再現率を 図 8 に示す．

リアルパスの長さが 100 と固定した場合に、誤り検出の効果があるのは、誤りの数が 1 ~ 98 のときである．誤りの数が 0 のときは誤りがなく、再現率は Naive でも 100% となる．誤りの数が 100 のときはイベントがなく、Improved の再現率は Naive と同じ 0% となる．経路ルールによる誤り検出がイベントの履歴から誤りを検出するものであるため、イベントがない場合には誤り検出できないため、Naive と変わらない．誤りの数が 99 のときはイベントが 1 つだけで、Improved の再現率は Naive と同じ 1% となる．経路ルールによる誤り検出が 2 つ以上のイベントを用いて誤りを検出するものであり、イベントが 1 つの場合には誤り検出できないため、Naive と変わらなくなる．誤りの数が 1 ~ 98 のときは、誤りの数が増えるにつれて、再現率は低くなるが、同時に Improved の場合の検出でき

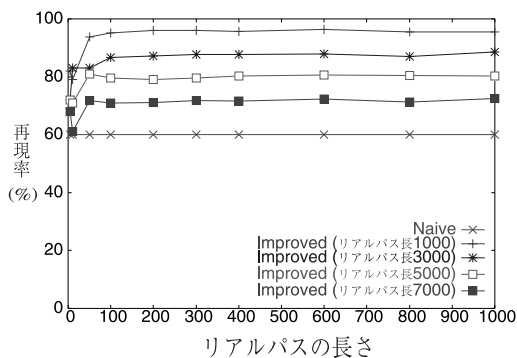


図9 リアルパスの長さに対する再現率

Fig. 9 The recall rates for each real-path length.

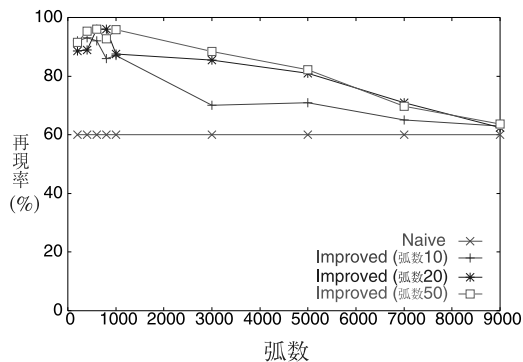


図10 弧数に対する再現率

Fig. 10 The recall rates for each edge number.

る誤りが増え、結果として誤り検出による効果が高くなっている。イベントの数が減るにつれて、誤りを検出する可能性が高くなることと、検出した場合に修正する誤りが多いことが理由であると推測される。

Improved の場合の中で、弧数は 3,000, 5,000, 7,000 の 3 パターンを示しているが、弧数が多いほど再現率は低くなっている。これは、弧数が多いほど有向グラフに並行パスやループが存在しやすく、並行パスやループによる検出もれが発生しやすくなるためであると考えられる。

上記のことから、2 つ以上のイベントが期待できるような場合には、経路ルールによる誤り検出が RFID 情報システムに有効であるといえる。

### 3.2.2 リアルパスの長さに対する再現率

次に、リアルパスの長さに対する再現率を図 9 に示す。

リアルパスの長さに対する誤りの割合を 60% に固定した場合、リアルパスの長さが 5 ~ 1,000 の間では誤り検出の効果が確認できた。リアルパスの長さが 5 ~ 100 程度までは、Improved の再現率が急激に高くなっていき、200 程度を超えると、ある一定の間隔内に安定していく。文献 5), 17) で示されたとおり、リアルパスの始点・終点での誤りは経路ルールによって検出されない。そのためリアルパスの長さに対する誤りの割合が一定であっても、リアルパスが長くなることで、リアルパス全体に対しての始点・終点での誤りによる検出もれが発生したときの影響が少なくなり、リアルパスがある一定の長さを超えると、始点・終点での誤りによる検出もれの影響がほとんどなくなってしまうことがこのような結果となる理由と推測できる。

Improved の場合の中で、弧数は 1,000, 3,000, 5,000, 7,000 の 4 パターンを示しているが、弧数が多いほど再現率は低くなっている。これは、3.2.1 項と

同様に、並行パスやループによる検出もれが発生しやすくなるためであると考えられる。

### 3.2.3 弧数に対する再現率

弧数に対する再現率を図 10 に示す。

有向グラフの弧数が 200 ~ 9,000 の間では誤り検出の効果が確認できた。弧数が 200 ~ 1,000 程度までは、Improved の再現率が若干高くなっていき、それ以上に弧数が増えると、徐々に Improved の再現率が低くなっていく。弧数が 200 ~ 1,000 程度までは、ノード数に対する弧数の割合が少なく、作られる有向グラフが非連結グラフになってしまう。非連結グラフになった場合は、非連結グラフに存在する連結グラフの、ノード数に対する弧数の割合が増え、並行パスやループによる検出もれが発生しやすくなる。弧数が 200 から増えていくにつれ、非連結グラフが作成される確率が減っていくので、弧数が 1,000 程度までは Improved の再現率が若干高くなっていく。弧数が 1,000 を超えると、有向グラフ全体のノード数に対する弧数の割合が、非連結グラフに存在する連結グラフの、ノード数に対する弧数の割合よりも大きくなり、並行パスやループによる検出もれが発生することで、徐々に Improved の再現率が低くなっていくものと推測できる。

Improved の場合の中で、リアルパスの長さは 10, 20, 50 の 3 パターンを示しているが、リアルパスの長さが 10 の場合が他の 2 つに比べて低くなっている。この場合は図 9 における左端で値が高い値に安定していない状態に相当し、リアルパスの始点や終点で検出もれが起きることにより他の場合に比べて再現率が下がっていると考えられる。

上記のことから、経路ルールを表す有向グラフにおいて、ノードに対する弧数の割合が低いほど、経路ルールによる誤り検出が効果的であるといえる。



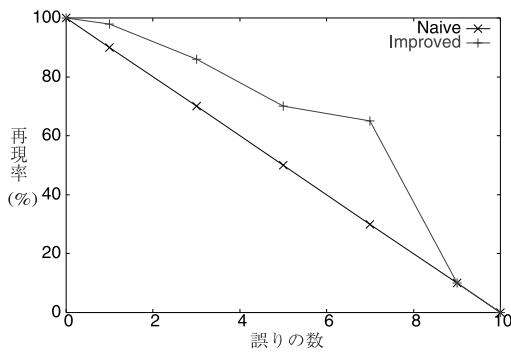


図 11 誤りの数に対する再現率 (現場)

Fig. 11 The recall rates for each error number (on site).

### 3.2.4 観測実験に即したシミュレーション

2章での RFID タグを移動させた場合の観測実験の結果に対して、誤りを検出し、実際に歩いた経路であるリアルパスと手動で比較することで修正を行った場合と、シミュレーションによる評価を比較し、考察する。

経路ルールはランダムなグラフではなく、図 6 のような有向グラフを用いた。

本章での評価実験と同様の簡易シミュレーションプログラムを用いて、図 6 の有向グラフに対して、同様のシミュレーションを行い、誤りの数に対する再現率およびリアルパスの長さに対する再現率を示し、観測実験の結果に対して手動で誤りを修正した場合の再現率と比較する。

図 11 に誤りの数に対する再現率を、図 12 にリアルパスの長さに対する再現率を示す。これらのグラフは、現実の環境から得られた図 6 のグラフを用いたという意味で、現場とラベル付けする。示されたグラフは 3.2 節におけるグラフと同様の傾向を持っている。

表 2 に観測実験の結果における再現率と、結果から手動で誤りを修正した場合の再現率を示す。どの条件においても、誤り検出の効果が現れていることが分かった。

さらに、表 2 の再現率を、図 11 にあてはめてみると、普通に歩く場合、遅く歩く場合、鞆に入れて歩く場合においては、ほぼシミュレーションによる評価と一致する。しかし、速く歩く場合と携帯電話と一緒に持って歩く場合は、手動による再現率がシミュレーションによる評価よりも劣っている。これは、観測実験でのリアルパスの長さは 10 と短く、観測実験で得られたイベントの履歴には、リアルパスの始点・終点での誤りによる検出もれが非常に多かったためであると考えられる。

上記のことから、3章におけるランダムなグラフに

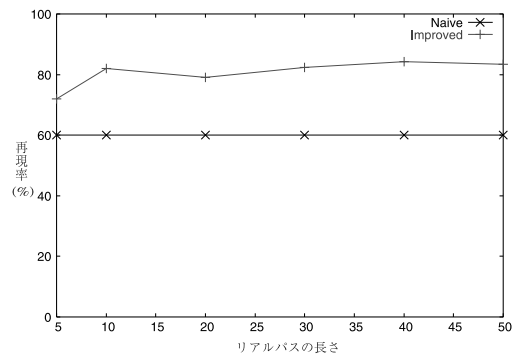


図 12 パスの長さに対する再現率 (現場)

Fig. 12 The recall rates for each real-path length (on site).

表 2 観測実験の結果と誤りを修正した場合の再現率

Table 2 The recall rates for the experimental results and corrected results.

	経路ルールを適用しない場合 (Naive) の再現率 (%)	経路ルールを適用した場合 (Improved) の再現率 (%)
普通(移動時間約1分)	56	72
遅い(約1分30秒)	75	90
速い(約30秒)	37	52
鞆(約1分)	50	69
携帯電話(約1分)	30	37

よるシミュレーションは、現実の経路ルールによる結果と大きく外れることはないことが推測できる。また、リアルパスの始点や終点でのイベントを得ることは、他のノードでのイベントを得ることよりも重要な意味を持ち、始点・終点での誤りを防ぐことで経路ルールによる誤り検出をより効果的にすることができると考えられる。

### 3.3 議論

2章では、RFID タグの速度やリーダの環境により RFID の認識率が変化することが実験により示された。また、3章では、ランダムなグラフにおいてシミュレーションを行い、経路ルールによる誤り検出の能力を評価し、2章における設定を用いても同様のシミュレーション結果が出ることを確認した。本節ではこれらの結果に基づき、RFID 情報システムにおいて経路ルールを効果的に適用する方法を考察する。

リーダの配置：リーダの配置についてはここまで議論していないが、実際の RFID 情報システムではリーダの配置を自由に決めることができることが多い。3.2.3 項により、ノード数に対して弧の数が少ないほど誤り検出能力が高いことが分かるため、リーダの配置は弧の数が少なくなるように配置することが望まし

い。文献 5) ではリーダを増やすことにより弧の数を相対的に減らす方法が述べられているが、リーダの数を増やさずに弧の数を少なくする方法は今後の課題である。

リーダの精度：2章により、リーダがシステムの信頼性に影響を与える原因として、RFID タグとリーダの距離が離れる場合や、リーダの置かれた場所が通信に悪影響を与えるような環境にある場合に信頼性が下がることが確認された。このような場合にも経路ルールを用いて誤り検出をすることができるが、リーダがリアルパスの始点・終点にあたる場合には効果がないことが 3.2.2 項により分かった。したがって実際のシステムにおいてリアルパスの始点・終点となるのが分かるリーダである場合(例：建物の出入り口)においては、認識の頻度を上げる、リーダの出力を上げる、アンテナの構造を工夫するといった方法によりリーダの精度を上げることが効果があるといえる。

RFID タグの信頼性：2章により、RFID タグの環境がシステムの信頼性に影響を与える原因として、複数の RFID タグが存在する場合や RFID タグとともに同行する物が存在する場合があげられる。このような場合にも経路ルールを用いて誤り検出をすることができるが、極端に認識率が低い場合にはその効果がないことが 3.2.1 項により分かる。これについて、複数の RFID タグの存在に対しては、他に RFID タグが存在することを知り文献 5) であげられるグループ化により管理し、リーダの出力や頻度によりリーダの精度を制御することが考えられる。

#### 4. おわりに

本論文では、RFID を用いた情報システムにおいて RFID タグの認識の信頼性が低下する場合があることを実際に確認し、それをシステム側の工夫により補償する手法をシミュレーションにより評価した。

謝辞 本論文は、平成 14-18 年度科学研究費補助金(学術創成研究費)(課題番号：14GS0218)、および平成 15-16 年度科学研究費補助金(若手研究(B))(課題番号：15700100)による。

#### 参 考 文 献

- 1) Friedman, D., Heinrich, H. and Duan, D.-W.: A low-power CMOS integrated circuit for field-powered radio frequency identification tags, *ISCC Digest of Technical Papers* (1997).
- 2) Kaiser, U. and Steinhagen, W.: A low-power transponder IC for high-performance identification systems, *IEEE Journal of Solid-State*

- Circuits*, Vol.30, No.3, pp.306-310 (1995).
- 3) Want, R., Fishkin, K.P., Gujar, A. and Harrison, B.L.: Bridging Physical and Virtual Worlds with Electronic Tags, *Proc. ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '99)* (1999).
- 4) Vogt, H.: Efficient Object Identification with Passive RFID Tags, *Proc. International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2002)* (2002).
- 5) 萩原大輔, 井上創造, 渡部貴大, 安浦寛人: 信頼性向上のための RFID 情報システムモデル, 情報処理学会研究報告, 2004-UBI-3, pp.55-62 (2004).
- 6) Narita Airport Authority: Narita Airport News. [http://www.narita-airport.or.jp/naa\\_e/greenport/2001.11.12/05-airport.news.pdf](http://www.narita-airport.or.jp/naa_e/greenport/2001.11.12/05-airport.news.pdf)
- 7) Ubiquitous ID Center: FTP: Food Traceability Project (2003). <http://www.uidcenter.org/press/TEP030623-e1.pdf>
- 8) RFID Journal: Learning from Prada (2002). <http://www.rfidjournal.com/article/articleprint/425/-/1/1>
- 9) Checkpoint Systems, Inc.: Checkpoint Intelligent Library System — Changing the Role of the Librarian (1999). <http://www.checkpointsystems.com/docs/librarian.pdf>
- 10) 耐環境・金属対応 RFID を使った家電リサイクル率向上の実証実験, 月刊バーコード, Vol.16, No.5, pp.44-45 (2003).
- 11) 井上創造, 萩原大輔, 佐々木淳, 青木 靖, 秋元一美, 浜崎陽一郎, 安浦寛人: RFID によるイベント支援マルチサービスシステム「RICA」の実証実験, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO 2003)シンポジウム, pp.277-280 (2003).
- 12) 石川俊治: IC タグ(RFID)と Auto-ID Center 活動, 第 3 回 21 世紀のマイクロエレクトロニクスセミナー「ユビキタスネットワーク社会実現のためのキー・テクノロジー」(2002).
- 13) IC カードシステム利用促進協議会: IC カード総覧 2001.
- 14) 勝田圭介, 柳沢 豊, 佐藤哲司: 分散型移動軌跡データベースのためのインデックス構築手法, 情報処理学会研究報告, 2004-DBS-132, pp.17-24 (2004).
- 15) Bohn, J. and Vogt, H.: Robust Probabilistic Positioning based on High-Level Sensor-Fusion and Map Knowledge, Tech. Rep. 421, Institute for Pervasive Computing, ETH Zurich (2003).
- 16) Gu, T., Wang, X., Pung, H. and Zhang, D.: An Ontology-based Context Model in Intelligent Environments, *Proc. Communication Networks and Distributed Systems Modeling and*

*Simulation Conference* (2004).

- 17) Inoue, S., Hagiwara, D. and Yasuura, H.: A Systematic Approach for the Reliability of RFID Systems, *Proc. IEEE TENCON 2004* (CD-ROM) (2004).

(平成 16 年 9 月 14 日受付)

(平成 17 年 1 月 29 日採録)

(担当編集委員 石川 博, 原 隆浩, 片山 薫, 佐藤 聡, 土田 正士)



萩原 大輔  
ソニーグローバルソリューションズ(株). 平成 16 年九州大学大学院システム情報科学府修士課程修了. RFID 情報システムの研究に従事.



井上 創造(正会員)  
九州大学大学院システム情報科学研究院助手・九州大学システム LSI 研究センター助手(併任). 平成 14 年九州大学大学院システム情報科学研究科博士後期課程修了. 博士(工学). データベースおよび RFID 情報システムの研究に従事. IEEE, ACM 各会員, 日本データベース学会正会員.



安浦 寛人(正会員)  
九州大学大学院システム情報科学研究院教授・九州大学システム LSI 研究センター長(併任). 昭和 53 年京都大学工学研究科修士課程修了. 工学博士. システム LSI 設計手法の研究に従事. 電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員.