

RFID 情報システムにおける システム信頼性の向上

System Reliability in RFID Information Systems

井上 創造[♦] 萩原 大輔[▲]
安浦 寛人[♥]

Sozo INOUE
Hirotō YASUURA

Daisuke HAGIWARA

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 タグは様々な要因によって認識誤りが起ることを示し、シミュレーションによる提案手法の効果を示す。

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, and show the effect of our approach by simulations.

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)[3][4]情報システムが導入され始めている[1][2]。

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ーが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。例えば、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、単純にリーダー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、リーダー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、複数のリーダー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[5]についてシミュレーションによる評価を行う。

2. 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をいう。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する。

信頼性を数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。

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。例えば、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。リーダー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もつサーバが存在する。経路ルール $D(V,A)$ は、以下のように定義される：各リーダーをノード $v \in V$ 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。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1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 $X = \langle r_{b1}, \dots, r_{bk} \rangle$ をリアルパスとよぶ。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 を認識したリーダーのログをノード系列 $S = \langle r_{s1}, \dots, r_{sl} \rangle$ 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_{si} 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。

♦ 正会員 九州大学 大学院システム情報科学研究所 システムLSI研究センター sozo@slrc.kyushu-u.ac.jp

▲ (株) ソニーグローバルソリューションズ

♥ 九州大学 大学院システム情報科学研究所 システムLSI研究センター yasuura@slrc.kyushu-u.ac.jp

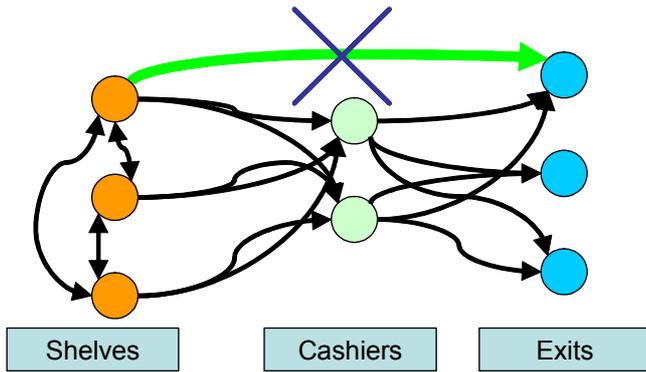


図 1 有向グラフで表現された経路ルール例

Fig. 1 An Example of Route Constraints

システムの動作は以下のようになる。

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・インターフェースに、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 k 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 が用意されていない場合は用意する。
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かればこれを $\langle r', j \rangle$ 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。

3. RFID情報システムにおけるRFIDタグの認識の観測実験

本節では、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。

3.1 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3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。サーバは制御PCから受信したデータをデータベースに格納する。構築したRFID情報システムの構成を図2に示す。

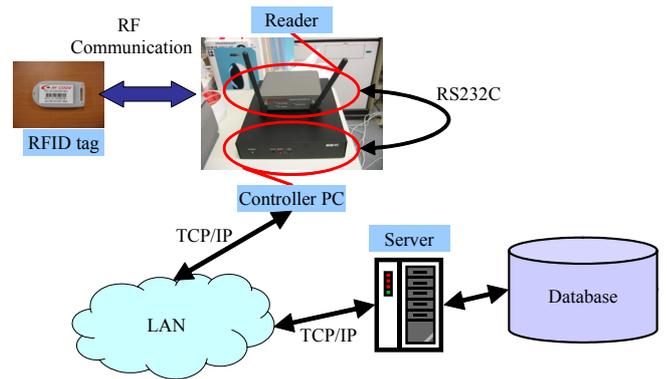


図 2 構築した RFID 情報システムの構成

Fig. 2 The Construction of the RFID Information System

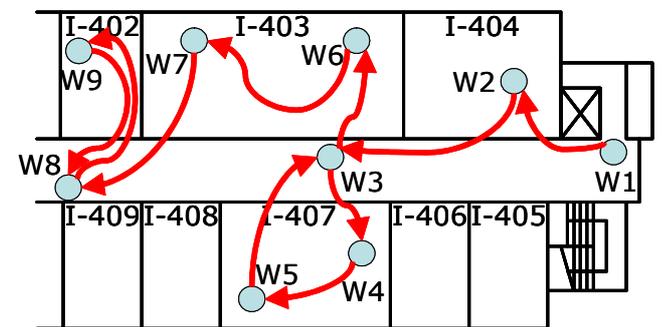
RFIDタグとリーダの仕様は以下のとおりである。

[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：303.825MHz±200KHz，発信間隔：約7.0秒

[リーダ:]スパイダリーダ，送信レート：19200bps，受信周波数：303.825MHz

3.2 RFIDタグを移動させた場合の実験

前節の観測で用いたRFIDタグのひとつを用いて、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、一人が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3にある順に移動した。



Route (Length:10) : W1→W2→W3→W4→W5→W3→W6→W7→W8→W9→W8

図 3 RFID タグの移動経路

Fig. 3 The Route of RFID tags

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よぶ。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。

Tab. 1に示す種々の条件において、図3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る。

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 種々の条件下での再現率

Tab. 1 The Recall Rates on several conditions

	平均 エラー 数	平均 再現 率 (%)
普通に歩いた場合 (移動時間約1分)	4.4	56
ゆっくり歩いた場合 (移動時間約1分30秒)	2.5	75
速く歩いた場合 (移動時間約30秒)	6.3	37
鞆に入れて普通に歩いた場合 (移動時間：約1分)	5.0	50
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)	7.0	30

表1にあるように、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、思い通りのリーダで思い通りの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、現実世界での物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。

4. 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],[6]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。従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る。

4.1 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：

- 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：
 - まず n 個のノードを作りノード集合 V に加える。
 - 次に2つの乱数の組 $i,j(0 < i,j < n)$ を用意し、弧 (i,j) が弧集合 V に存在しなければこれに加える。
 - (ウ) (b)を V の要素数が e になるまで繰り返す。
- 経路ルール $D(V,A)$ のパスとなりうるイベントの列を p 個ランダムに作る。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。
- 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みなす。
- 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。
- 経路ルールと、2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。
- 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)と経路ルールを利用する場合(Improved)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、種々の条件に対して、再現率の計算を10回試行し、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。

4.2 実験結果

誤りの数に対する再現率を図4に示す。

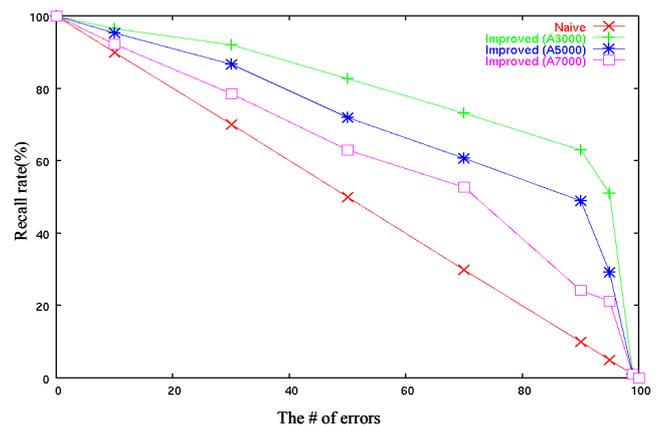


図 4 誤りの数に対する再現率

Fig. 4 The Recall Rates for the Number of Errors

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の場合でも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の場合と同じ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の場合と変わらない。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の場合と同じ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の場合と変わらない。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。

4.3 観測実験に即したシミュレーション

3.2節での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する。経路ルールはランダムなグラフではなく、図3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3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5に誤りの数に対する再現率を示す。示されたグラフは4.2節におけるグラフと同様の傾向を持っている。

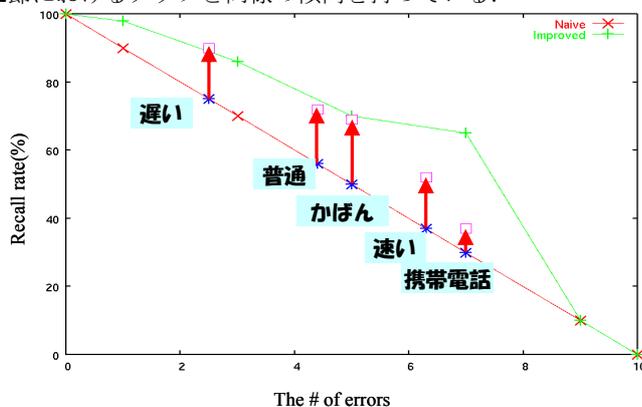


図 5 誤りの数に対する再現率 (現場)

Fig. 5 The Recall Rates for the Number of Errors (Real)

図4.2における矢印の始点と終点はそれぞれ、観測実験の結果における再現率と、観測実験の結果から手動で誤りを修正した場合の再現率である。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多

かったためであると考えられる。

上記のことから、4節におけるランダムなグラフに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。

5. 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可能性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(2)) (課題番号: 14GS0218) による。

[文献]

- [1] R.Want, K.P.Fishkin, A.Gujar, B.L.Harrison, "Bridging Physical and Virtual Worlds with Electronic Tags", Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '99), May, 1999.
- [2] H.Vogt, "Efficient Object Identification with Passive RFID Tags", In Proceedings of International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2002), Aug. 2002.
- [3] D.Friedman, H.Heinrich, and D.W.Duan, "A low-power CMOS integrated circuit for field-powered radio frequency identification tags", ISCC Digest of Technical Papers, Feb. 1997.
- [4] U.Kaiser and W.Steinhausen, "A low-power transponder IC for high-performance identification systems", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 30, No. 3, pp. 306-310, Mar. 1995.
- [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, Jan. 2004.
- [6] S.Inoue, D.Hagiwara, H. Yasuura, "A Systematic Approach for the Reliability of RFID Systems", Proc. IEEE TENCON 2004 (CD-ROM), Nov. 2004

井上 創造 Sozo INOUE

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 研究センター助手 (兼任). 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. 情報処理学会, IEEE, ACM 各会員, 日本データベース学会正会員.

萩原 大輔 Daisuke HAGIWARA

(株)ソニーグローバルソリューションズ. 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.

安浦 寛人 Hiroto YASUURA

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 (兼任). 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, 情報処理学会, IEEE, ACM 各会員.