

論文

応答確率制御法による大量電子タグの高速読み出し

中野 博隆^{†a)} 長手 航^{††} 平野 裕介^{††} 笹部 昌弘[†]

Fast readout of many RFIDs by Response Probability Control Method

Hirotaka NAKANO^{†a)}, Wataru NAGATE^{††}, Yusuke HIRANO^{††}, and Masahiro SASABE[†]

あらまし 大量電子タグの高速一括読み出しを実現する新しい応答確率制御法について報告する。リーダによる電子タグの読み出しは読み出し要求に対して、1個の電子タグのみが応答を返す場合に成功する。本論文で提案する応答確率制御法は、読み出し要求に対して電子タグが応答する確率をリーダから指定して、読み出し成功確率の向上を図る。基本的な特性を明らかにすると共に、読み出し状況からリーダにおいて最適な応答確率を推定する方法を示し、これが十分利用できることを示した。この結果、大量の電子タグを高速に読み出せる見通しを得た（物理的な課題を除く）。既存の複数電子タグ一括読み出し法として FSA (Flamed Slotted ALOHA) とそれを改良した DFSA (Dynamic FSA) がある。属性情報を含むような可変長の読み出しに高い効率が期待できること、無応答の検出時間が短い場合、これを利用して読み出し速度の高速化が可能なこと等において本方法が優れ、試算した条件の下では約 1.6 倍の高速化が可能であった。なお、本論文はシミュレーション確認による方法の提案であり、実装確認は今後の課題である。

キーワード 電子タグ, リーダ, 高速読み出し, 確率制御, FSA

1. まえがき

電子タグ [1] は識別子やその属性情報を無線で読み出せる小さなアンテナ付きのチップである。バーコードに比較し情報量が大きく、商品種別だけでなく商品個別の識別情報やその属性情報まで扱えること、リーダを近づけるだけで読み出せる柔軟な操作が可能なことから、多くの応用と普及が期待されている。

大量の電子タグを一括して高速に読み出せれば、その応用範囲が飛躍的に拡大すると期待される。そこで、大量電子タグの高速な一括読み出しを実現する新しい方法である応答確率制御法（以下、RPCM: Response Probability Control Method と称す）を提案する。

RPCM の特性を明らかにし、既存の一括読み出し方法である FSA とそれを改良した DFSA と比較する。

2. 背景

2.1 電子タグ読み出し方法

電子タグ読み出し方法は大きく分けて 2 種類ある。読み出しをひとつ毎に行う単数読み出しと、一括して行う一括読み出しである。単数読み出しはリーダの操作、読み出し失敗時の再読み出しなどの処理を人手に頼っているが、システムとして完成している。一方、大規模な一括読み出しは従来人手に頼っていた処理の自動化、大量読み出しの効率化、読み出し完了の保証など解決しなければならない問題が残っている。

2.2 既存の電子タグ読み出し技術

電子タグは集積回路と小型のアンテナを組み合わせた素子技術として検討されている。一方、リーダと電子タグで構成されたシステムとしての検討も行われてきた。システムとしての第 1 の課題は、同じ素子に対して複数のリーダが作用し読み出しに失敗する、近接するリーダの相互干渉問題 [2], [3] である。次は、電子タグの読み出しを高速化する課題である。例えば、読み出し状態を記憶するだけで効率が大きく向上することが報告されている [4]。多数の電子タグを一括して読み出す方法も検討されている。この場合、リーダが

[†] 大阪大学サイバーメディアセンター, 豊中市
Cybermedia Center, Osaka University, 1-32 Machikaneyama,
Toyonaka, Osaka, 560-0043, Japan

^{††} 大阪大学情報科学研究科, 吹田市
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka
University, 1-32 Machikaneyama, Suita, Osaka

a) E-mail: nakano@cmc.osaka-u.ac.jp

多くの電子タグから同時に応答を受けることによる衝突問題は重要である。これを防ぐこと、即ち衝突回避 (anti-collision) が第 3 の課題である [5] ~ [8]。この衝突回避法が本論文の課題である。

読み出しの衝突回避方法には決定的回避法と統計的回避法の 2 種類ある。決定的回避法は、属性情報や識別子の一部を指定しながら、読み出す電子タグをひとつに絞り込んで識別子を読み出すものである [5], [7]。極めて多くの電子タグから特定範囲の電子タグを探す場合に有効であるが、絞り込みに時間がかかるため大量電子タグの一括読み出しには向かない。

統計的回避法は、確率的に成功する読み出しを積み重ねて全ての読み出しを行う方法である。現状の統計的回避法はワイアレス環境におけるパケット通信方式 (ALOHA) を基本としている。ALOHA ではパケット送信要求のある通信ノードが相手先ノードにパケットをランダムに送信する。送信タイミングの影響、パケット衝突の確率、送信パケット衝突時の再送法などが詳しく解析されている [9]。既存の電子タグの一括読み出しでは、この ALOHA を拡張した FSA (Framed Slotted ALOHA) [6], DFSA (Dynamic Framed Slotted ALOHA) [8] が用いられている。

FSA, DFSA の概要を図 1 に示す。FSA, DFSA ではリーダの読み出し要求に対し電子タグはいずれかのスロットを選んで応答する (Slotted ALOHA)。引き続き複数のスロットをまとめて 1 フレームとする。1 フレーム内のスロット数はフレームサイズと呼ばれる。リーダからの読み出し要求にフレームサイズが付け

られる。電子タグは 1 フレーム内のいずれかのスロットを用いて必ず応答を返す。以下、この読み出し要求をフレーム読み出し要求 (FRAME READOUT REQUEST) と呼ぶ。フレーム読み出し要求毎に、FSA では 16, 64 などの既定値からフレームサイズが選ばれるが、DFSA では任意のフレームサイズが指定できるように機能拡張されている。どの電子タグからも応答が無い場合および複数の電子タグから応答がある場合、それぞれ読み出しに失敗する。単一の電子タグから応答がある場合、読み出しに成功する。解析によるとフレームサイズを読み出すべき電子タグ数と一致させた時、最大の読み出し成功確率 (=読み出し速度) が得られる [8]。FSA, DFSA では、登録に成功した電子タグからの応答を抑制しない方法 [6] と抑制する方法 [8] がある。抑制しない場合、シーケンスは簡単であるが、複数フレームにわたって同じ電子タグから登録が起こり、全電子タグを読み出すまでの時間が増大する。また、100% の読み出しを保証するのが困難な場合がある。フレーム間において、読み出し抑制要求 (READOUT SUPPRESS REQUEST) を用いることが必要となるが、登録に成功した電子タグからの応答を抑制すれば、このような無駄な読み出しは起こらず、100% の読み出し保証が容易となる。このため、ここでは RPCM と応答を抑制する DFSA との比較を行った。

2.3 電子タグ読み出し方法の標準化

非接触カードの規格として、リーダとカード間の距離が 7-15cm 程度までの ISO/IEC 14443 シリーズ (近接型) [10] と 50-70cm 程度までの ISO/IEC 15693 シリーズ (近傍型) [11] がある。両者とも電子タグに適用できるが、大量一括読み出しには読み出し距離が大きい近傍型が第一候補と思われる。但し、近傍型の読み出し速度は規格上 26Kbps 程度までであり、106Kbps 以上ある近接型に比較し不利である。ISO/IEC 15693 シリーズの衝突回避プロトコルには FSA が用いられており、フレームサイズとして 16 または 64 が定められている。

3. 応答確率制御法 (RPCM)

3.1 検討の前提

微小なワイアレス装置には、リーダからの遠隔給電により動作するパッシブ型と電池を持つアクティブ型がある。電子タグは簡単な構造でコストを抑えるため、パッシブ型が主流である。パッシブ型を前提に下記に

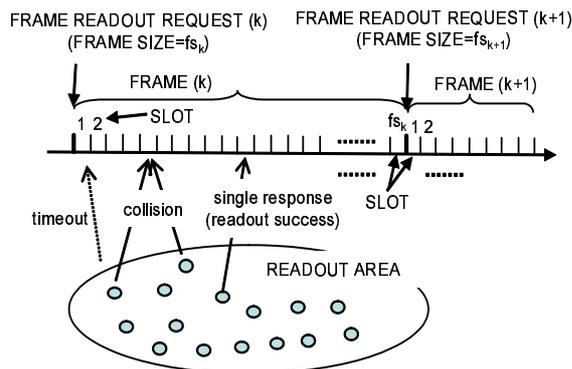


図 1 FSA (Framed Slotted ALOHA), DFSA (Dynamic Framed Slotted ALOHA) の概要

Fig. 1 The outline of FSA (Framed Slotted ALOHA) and DFSA (Dynamic Framed Slotted ALOHA)

より RPCM の検討を行う。

3.1.1 サービス的条件

- 読み出し数の上限がないこと

電子タグの一括読み出し数の拡大には下記に示す物理的な条件を再検討する必要がある。しかし、これらは素子技術の発展に期待し、読み出し数は無限に拡大できるものとする。

- 全てのタグは読み出し終了まで静止している
- 一括して読み出すタグ数は変動し、その数が予め与えられることは無い

3.1.2 設計条件

- リーダからの読み出し要求に対して電子タグが応答する、問い合わせ応答シーケンスを用いる。
- 電子タグは RPCM 実現のために必要な制御機能とメモリを持つものとする。

3.1.3 物理的条件

- 他の電子タグのキャリアはセンスできない

電子タグの小型化を実現するため、アンテナサイズを小さくする必要があるためである。

- 電子タグ相互のカップリング効果は考慮しない
ある電子タグが給電を受けると、その影響から付近の電子タグの給電量が減る。このため、完全に重なってしまった電子タグは読みにくくなる。この解決にはアンテナサイズ、形状などの物理的な検討が必要であるが、検討範囲外とする。

- キャプチャ効果は考慮しない

受信電力差のある複数の電波信号を受信した時、弱い電力の信号が完全に抑制され強い電力を持つ信号が正常に受信されることがある。検討を簡単化するためこの効果は考慮しないこととする。

3.2 RPCM の詳細

RPCM における電子タグの読み出しを図 2 に示す。この図はリーダが読み出し領域内の複数電子タグから識別子を読み出している状況、シーケンス、コマンドフォーマットを示している。リーダと電子タグの状態遷移を図 3 に示す。

3.2.1 シーケンスと動作

- シーケンス

リーダの読み出し領域にある電子タグはリーダから電磁誘導あるいは電磁波照射によるエネルギー供給を受ける。すると、電子タグの回路が起動し、リーダからのコマンドを受信できるようになる。

(1) リーダは電子タグに識別子の読み出し要求 [識別子要求 (READOUT REQUEST)] を出す。同時に電

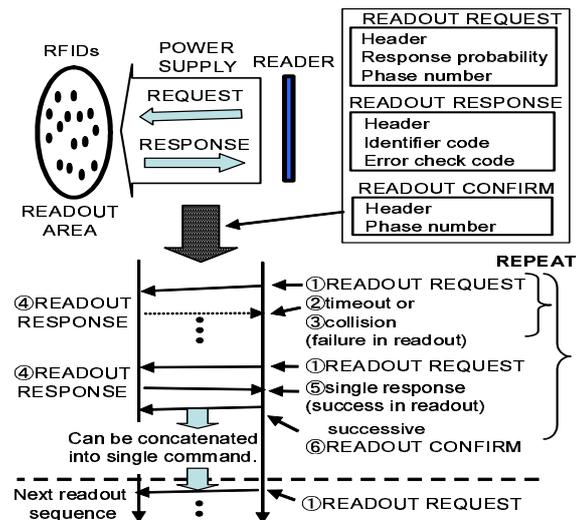


図 2 RPCM による電子タグの読み出し

Fig. 2 Readout of RFID by RPCM (Response Probability Control Method)

子タグが応答すべき確率 [応答確率 (Response probability)] を指定する。

(2) いずれの電子タグも応答 [識別子応答 (READOUT RESPONSE)] しない場合、リーダは読み出しのタイムアウトを検出し、読み出し失敗となる。

(3) 2 個以上の電子タグが応答した場合、リーダは応答の衝突を検出し、読み出し失敗となる。

(4) 単一の電子タグが応答を返した場合は、

(5) リーダの識別子受信が成功し、

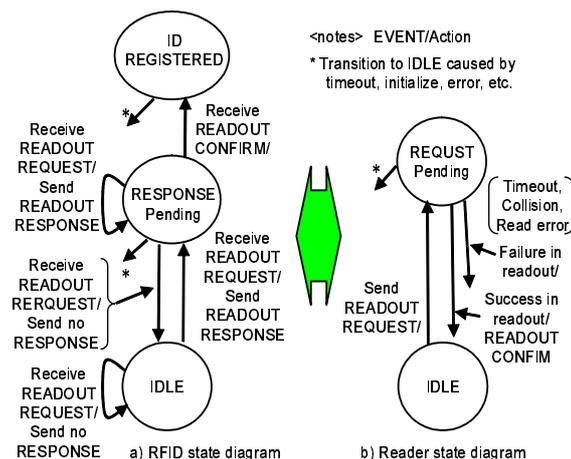


図 3 リーダと電子タグの状態遷移

Fig. 3 State diagram of a reader and a RFID

(6) 引続き受信が成功したことを知らせる識別子の確認 [識別子確認 (READOUT CONFIRM)] がリーダーから出される。

(2)(3)(6) の後、識別子要求 (1) が繰返される。

- 動作

電子タグは識別子に誤り検出符号を添付する。リーダーはこの誤り検出符号を検査し、正常受信であれば衝突は無く、異常受信であれば衝突があったと判断する。この場合を含め、大量一括読み出しでは受信完了の確認のため、誤り検出符号を用いることが必須である。

識別子応答に続いて、識別子確認を受信した電子タグは識別子の登録に成功したと判断し、以後の識別子要求には応答しない。なお、引き続き識別子要求中の特定の情報 (確認ビット) で識別子確認が代用できる (図 2 参照)。識別子確認時間は実質的にゼロとなる。

リーダーから応答確率が 1 の識別子の読み出し要求を行う。これに対して、無応答の場合、全ての読み出しが終了したと判断できる。

全ての要求にはフェーズ番号 (Phase number) が埋め込まれている。これが更新された場合には、全ての読み出しを初期状態に戻し、全ての電子タグは再度識別子の読み出し要求に応答する。

- RPCM と DFSA の併用

RPCM と DFSA は組み合わせることができる。リーダーからのフレーム読み出し要求 (図 1) のオペランドに応答確率を加える。各電子タグはフレーム読み出し要求に対し、指定された応答確率で応答する。応答する場合には、フレーム内のいずれかのスロットをランダムに選んで応答する。フレーム読み出し要求と識別子要求は兼用され、一度指定された応答確率は特定のフレーム内で継続的に用いられる。読み出し抑制 (読み出し確認) はフレーム間で行う。

DFSA では超大量タグを大きなフレームサイズで読み出すと、初期のフレームサイズ推定誤差やフレーム同期外れの影響が大きい。RPCM では一つの電子タグを読み込むたびに識別子要求が必要である。両方法の組み合わせは、これらの特性を補間している。

3.2.2 動作解析

- 識別子の読み出し成功確率

識別子の読み出し成功確率とこれを最大とする応答確率を求める。各変数を次のように定義する。

n : 読み出し領域内の読み出し前の電子タグ数 (以降、電子タグ数と称す)

$P_0(n)$: 応答数が 0 となる確率

$P_1(n)$: 応答数が 1 となる (読み出し成功) 確率

$P_{2+}(n)$: 応答数が 2 以上となる確率

P_{rsp} : リーダーが指定する電子タグの応答確率

電子タグの応答数が 0 となる確率は n 個の電子タグが全て応答を返さない場合である。電子タグの応答数が 1 となる確率は、1 個の電子タグが応答し残りが応答しない場合である。これらから、電子タグの各応答確率は次式により求まる。

$$P_0(n) = (1 - P_{rsp})^n \quad (1)$$

$$P_1(n) = n C_1 P_{rsp} (1 - P_{rsp})^{n-1} \quad (2)$$

$$P_{2+}(n) = 1 - P_0(n) - P_1(n) \quad (3)$$

- 読み出し成功確率を最大とする応答確率

$P_1(n)$ は $0 < P_{rsp} < 1$ の間に最大値を持つ。従って、 $P_1(n)$ を P_{rsp} で微分しゼロとおくことにより、読み出し成功確率を最大とする応答確率が求まる。 $\frac{dP_1(n)}{dP_{rsp}} = n(1 - P_{rsp})^{n-2}(1 - nP_{rsp})$ より、

$$P_{rsp}^{opt} = \frac{1}{n} \quad (4)$$

この時の電子タグ応答数の期待値は 1 である。

リーダーによる電子タグ推定数を n_e とする (電子タグは確率 $P_{rsp} = \frac{1}{n_e}$ で応答する)。この時の読み出し成功確率は次式で与えられる。

$$P_1^{n_e}(n) = \frac{n}{n_e} \left(1 - \frac{1}{n_e}\right)^{n-1} \quad (5)$$

電子タグ数と読み出し成功確率の関係を図 4 に示す。推定数を実数と一致する場合の最大読み出し成功確率は次式である。

$$P_1^{opt}(n) = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} \quad (6)$$

電子タグ数 n が無限大の時の最大読み出し成功確率は $x = -\frac{1}{n}$ とおき $x \rightarrow 0$ として得られる。

$$\begin{aligned} P_1^{opt}(x) &= \lim_{x \rightarrow 0} \left((1+x)^{\frac{1}{x}}\right)^{-1} (1+x)^{-1} \\ &= \frac{1}{e} (= 0.3678 \dots) \end{aligned} \quad (7)$$

e は自然対数の底で、その値は 2.718... である。このように、電子タグ数がどのように多くなっても一定の読み出し成功確率が得られる。

電子タグ数と読み出し関連の確率の関係を図 5 に示す。 $n \rightarrow \infty$ に対し、最大読み出し成功確率は $\frac{1}{e}$ に、無応答確率も $\frac{1}{e}$ に、衝突確率は $1 - \frac{2}{e}$ に収束する。

• 電子タグの読み出し速度を最大とする応答確率無応答検出時間 (以下, $t_{timeout}$ と称す), 成功時の読み出し時間 (以下, $t_{success}$ と称す), 衝突検出時間 (以下, $t_{collision}$ と称す) が異なる場合は, 読み出し速度を最大とする応答確率は読み出し成功確率を最大とする応答確率とは異なる. なお, 各時間にはそれぞれに対応する要求・応答の送信時間だけではなくオーバーヘッドを含むものとする.

$t_{timeout}$ が $t_{success}$ や $t_{collision}$ に比較短い場合は $\frac{1}{e}$ よりも小さい応答確率で最大読み出し速度が得られる. 以下に条件を示す.

1 電子タグ当たりの読み出し時間 t_1^{RSP} は各変数を使って $(P_0 \cdot t_{timeout} + P_1 \cdot t_{success} + P_{2+} \cdot t_{collision}) \frac{1}{P_1} + t_{confirm}$ と表せる. ここで, $t_{confirm}$ は読み出し確認時間である.

読み出し誤り検出により衝突を検出する場合を仮定し $t_{collision} = t_{success}$ とする. t_1^{RSP} は $0 < P_{rsp} < 1$ の間に最小値を持つ. そこで, t_1^{RSP} を P_{rsp} で微分しゼロとして, 各時間が異なる場合の最適応答確率 P_{rsp}^{opt-G} が求まる. 計算を進めて次式を得る.

$$\frac{1 - n P_{rsp}^{opt-G}}{(1 - P_{rsp}^{opt-G})n} = \frac{t_{success} - t_{timeout}}{t_{success}}$$

ここで, $t_{success} = t_{timeout} = t_{collision}$ の時の応答確率最適値 $\frac{1}{n}$ と, そこからの変分 Δ (以下, 応答確率変分と称す) を使い P_{rsp}^{opt-G} を表し, さらに n が十分大きいとして次式を得る.

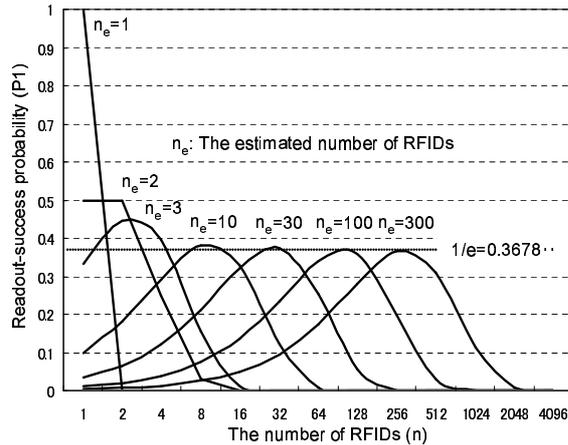


図4 電子タグ数と読み出し成功確率
Fig. 4 The number of RFIDs and readout success probability

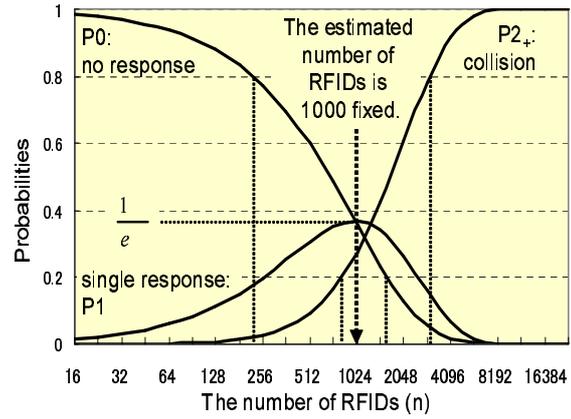


図5 電子タグ数と読み出し関連の確率
Fig. 5 The number of RFIDs and readout related probabilities

$$P_{rsp}^{opt-G} = \frac{\Delta}{n} \quad (8)$$

$$(1 - \Delta)e^{\Delta} = \frac{t_{success} - t_{timeout}}{t_{success}} \quad (9)$$

式9の右辺を無応答時間寄与率 (Timeout contribution ratio) と呼ぶことにする. 無応答時間寄与率と応答確率変分 Δ の関係を図6に示す. $t_{success}$ と $t_{timeout}$ が等しい時, 無応答時間寄与率はゼロであり, 応答確率変分 Δ は1である.

本節の条件下 ($t_{success}$ と $t_{collision}$ が等しく, かつ n が十分に大きい場合) では, 1電子タグ当たりの最小読み出し時間は次式で与えられる.

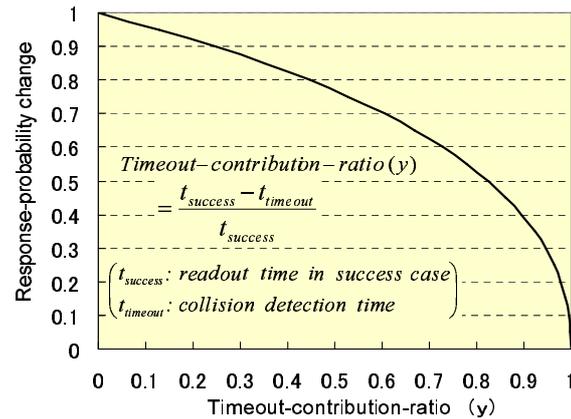


図6 無応答時間寄与率と応答確率変分 Δ
Fig. 6 Timeout-contribution-ratio and response probability change

$$t_1^{RSP} = t_{success} \cdot e^{\Delta} + t_{confirm} \quad (10)$$

- 最適制御時の電子タグ数 $n(t)$ の変化

識別子の読み出し成功確率は n の値が小さいほど大きい。しかし、その変化は比較的小さい(図 4)。例えば、 n が 10 の時の最大読み出し成功確率は 0.3874... であり、 n 無限の時 (0.3678...) との差は約 0.02(約 5.4%) である。このため、 n が大きい場合は、読み出し成功確率が一定として n の変化を近似できる。

$$n(t) \simeq n_0 - \frac{t}{t_{success}e^{\Delta} + t_{confirm}} \quad (11)$$

$$T_n \simeq n_0(t_{success}e^{\Delta} + t_{confirm}) \quad (12)$$

但し、 n_0 は全読み出し電子タグ数、 T_n は(全)読み出し時間である。 n は直線的に減少する。

- 電子タグ数の推定

最適な電子タグの応答確率を指定するため、リーダーは最適応答確率 ($= \frac{\Delta}{n}$) を推定する必要がある。利用できる過去の全ての情報を用いる推定法が理想であるが複雑過ぎるため、直前の電子タグの応答状況を用いて推定する簡易な方法を検討する。

電子タグ推定数を n_e とし、これを $m\Delta$ とおく。 m は見かけの推定数であり、無応答時間寄与がある場合 $m > n$ ($\Delta < 1$) である。 m の推定法を図 7 に示す。この方法では、衝突時は m を増大係数 ($ifactor$) 倍、タイムアウト時は減少係数 ($dfactor$) 倍、単一読み出し時は $\frac{1}{\Delta}$ 減 (マイナス $\frac{1}{\Delta}$) する。

- 増大係数と減少係数の最適な関係

以下、電子タグ数は十分に大きいと仮定する。例えば、増大、増大、 $\frac{1}{\Delta}$ 減、減少、減少、 $\frac{1}{\Delta}$ 減... の

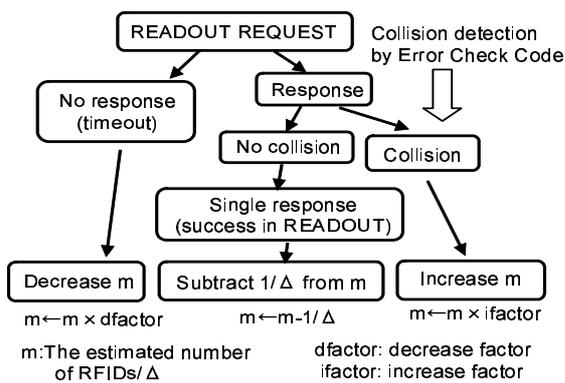


図 7 m (電子タグ数/ Δ) の推定法

Fig. 7 Estimation of m (The number of RFIDs/ Δ)

場合、推定数 n_k は初期推定数 n_0 を用いて、 $n_k = ((n_0 \cdot ifactor \cdot ifactor - \frac{1}{\Delta})dfactor \cdot dfactor - \frac{1}{\Delta}) \dots$ のように表せる。 n_0 が十分に大きいと $\frac{1}{\Delta}$ 減は無視でき、 $n_k = n_0 \cdot ifactor \cdot ifactor \cdot dfactor \cdot dfactor \dots$ となる。これから次式が得られる。

$$dfactor^{\text{減少回数}} \cdot ifactor^{\text{増大回数}} = \frac{n_k}{n_0} \quad \text{故に,}$$

$$dfactor^{P_0} \cdot ifactor^{P_{2+}} = \left(\frac{n_k}{n_0}\right)^0 \quad \text{故に,}$$

$$P_0 \cdot \log(dfactor) + P_{2+} \cdot \log(ifactor) = 0.$$

$P_{rsp} = \frac{\Delta}{n_e}$ を代入した式 1 と式 3 をここに代入し、 n_e が十分に大きいとして次式を得る。

$$dfactor = 10^{(1+\Delta-e^{\Delta}) \log(ifactor)} \quad (13)$$

式 13 を満たす増大係数と減少係数を平衡関係にあると定義する。 m に対して、衝突に伴う増大と無応答に伴う減少が平衡しているためである。

- RPCM のその他の電子タグ数推定法

読み取り要求無応答時に電子タグ推定数に $dfactor$ を乗じる代わりに減算係数 $sfactor$ を減算し、衝突時に $ifactor$ を乗じる代わりに加算係数 $afactor$ を加算する方法がある。シミュレーション確認によると、電子タグ数推定誤差が小さい場合に提案方法よりも性能の良い場合があるが、推定誤差の影響が大きく、平均すると劣る結果となった。

- DFSA の電子タグ数推定法

あるフレームの電子タグ数 n は、そのフレームサイズ ($= \frac{1}{P_{rsp}}$) と、読み出し処理から得られる衝突確率 P_{2+} を用いて、式 3 に従って推定できる [8]。

(以下は本論文の検証内容である)

無応答確率 P_0 と式 1 を使うこともできる。

初期推定誤差が大きいとこれらの確率は精度良く計算できない。特に、フレーム内スロットが全てタイムアウトの場合は全て衝突の場合は確率計算不能である。故に、制御パラメータとして (1) 全タイムアウト時のフレームサイズ倍率 ($tofactor < 1$)、(2) 全衝突時のフレームサイズ倍率 ($clfactor > 1$) を用いる(図 12)。

未読み出し電子タグ数 (= 次のフレームサイズ) は、現フレームの電子タグ推定数から単一応答数 (読み出し成功数) を減算して求める。このため、単一応答数の統計的な変動も推定数誤差の原因となる。

提案推定法との比較については図 12 にて述べる。

- 電子タグ推定数に誤りのある場合の読み出し

実数 n と推定数 n_e の比 (以下、推定誤差と称す) を $\alpha = \frac{n}{(\Delta m)}$ とする。電子タグ数が十分に大きい場合は次の

近似が成り立つ．

$$t_1^{RSP} \simeq \frac{t_{success}}{\alpha \Delta} e^{\Delta} (e^{\Delta(\alpha-1)} + \Delta - 1) + t_{confirm} \quad (14)$$

無応答，単一応答，衝突からなる各所要時間を $t_{tsc}(k)$ とすると t_1^{RSP} の平均 $\overline{t_1^{RSP}}$ は

$$\overline{t_1^{RSP}} = T_n/n_0 = T_n / \sum_{k \in \text{全期間}} \frac{t_{tsc}(k)}{t_1^{RSP}(k)} \quad (15)$$

である．但し， k は読み出し試行を示す．

電子タグ数が小さい領域では，読み出し成功確率が $\frac{1}{e}$ よりも大きくなることが顕在化し，読み出し時間が短縮する．本項にはこの効果を考慮する必要がある．この短縮時間を γ と置く． γ の詳細は次項に示す．

さらに， $t_{tsc}(k)$ がその平均値で総和から分離できるものと仮定し，処理を進め次式を得る．

$$\overline{t_1^{RSP}} = (t_{success} e^{\Delta} - \gamma) \beta(\alpha, \Delta) \quad (16)$$

$$\frac{1}{\beta(\alpha, \Delta)} = \left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} \frac{\Delta^{k-1} (\alpha-1)^k}{k! \alpha} \right)^{-1} \quad (17)$$

β は電子タグ推定誤差 α に基づく読み出し時間の増大率を示す（読み出し時間増大率と称す）．右辺のバーは読み出し試行に関する平均を示す（以下同）．誤差が小さい ($\alpha \simeq 1$) 場合，

$$\frac{1}{\beta'} \simeq \left(1 + \frac{\Delta(\alpha-1)^2}{2\alpha} \right)^{-1} \quad (18)$$

が成り立つ．式 18 の成立範囲についてはシミュレーションにて確認する． $\Delta = 1$ とおくと式 14~18 は DFSA にも適用できる．

- 読み出し時間の補正 (γ)

大規模な読み出しの場合，式 10 からの誤差（読み出し時間の短縮）は，初期推定誤りの影響が収束した推定誤りの小さい領域で現れる．そこで，一般的な n に関する読み出し時間 t_1^{RSP-G} を誤り無し ($\alpha = 1$) の条件下で求めた．

$$t_1^{RSP-G} = t_{success} \frac{(1 - \frac{\Delta}{n})}{\Delta} \cdot \left(\frac{1}{(1 - \frac{\Delta}{n})^n} - \frac{t_{success} - t_{timeout}}{t_{success}} \right) + t_{confirm} \quad (19)$$

式 19 を用いて電子タグ数全域にわたる総和を数値計算で求めると，正確な読み出し時間が求まる．近似解（式 10）との差分が γ である．

- RPCM と DFSA の併用

DFSA におけるフレームサイズを f_s ，RPCM における応答確率を P_{rsp} ，電子タグ数を n とする．電子タグがスロット毎に応答を返す確率は，指定された応答確率の効果 P_{rsp} とスロット分割の効果 $\frac{1}{f_s}$ を合わせて $\frac{P_{rsp}}{f_s}$ となる．スロット長が固定となるため，無応答検出時間寄与率はゼロである．即ち，

$$\frac{P_{rsp}}{f_s} = \frac{1}{n} \quad (20)$$

の時に最大の読み出し速度が得られる．

4. シミュレーションと評価

4.1 シミュレータの概要

解析の検証，解析には現れない詳細特性調査のためシミュレーションを行った．FSA と DFSA のシミュレーションも行い，本論文の比較が正しいことを確認した．なお，本論文は提案方法の実装までは行っていない．シミュレーションに用いたパラメータ値は参考値であり，その詳細確認は今後の課題である．

シミュレーションソフトは VC++ (マイクロソフト社) を用いて，イベントドリブン形で RPCM，DFSA を再現するように構成した．会話形式で条件を入力し，結果は CSV 形式でファイル出力し，エクセルを使ってこの CSV ファイルの解析とグラフ表示を行った．

4.2 シミュレーションによる読み出し特性の考察

- シミュレーション条件

リーダによる識別子要求送信時間を 1ms，タイムアウト検出時間を 1ms，電子タグの識別子応答送信時間を 5ms とした．これは，通信速度 26Kbps 程度の近傍型電子タグを想定し，(1) リーダの識別子要求送信に 26 ビット相当の送信時間とオーバーヘッドを，(2) 電子タグの識別子応答送信においては 130 ビット相当の送信時間とオーバーヘッドを想定したものである．

この時， $t_{success}$ と $t_{collision}$ は 6ms (識別子要求送信時間 + 識別子応答送信時間)， $t_{timeout}$ は 2ms (識別子要求送信時間 + タイムアウト検出時間) となり，式 9 から Δ は 0.6530 となる．前述したとおり， $t_{confirm}$ は識別子要求と兼用できるため 0ms とした．なお，以降では特に明示しない限り有効数字 4 桁で評価を行っている．

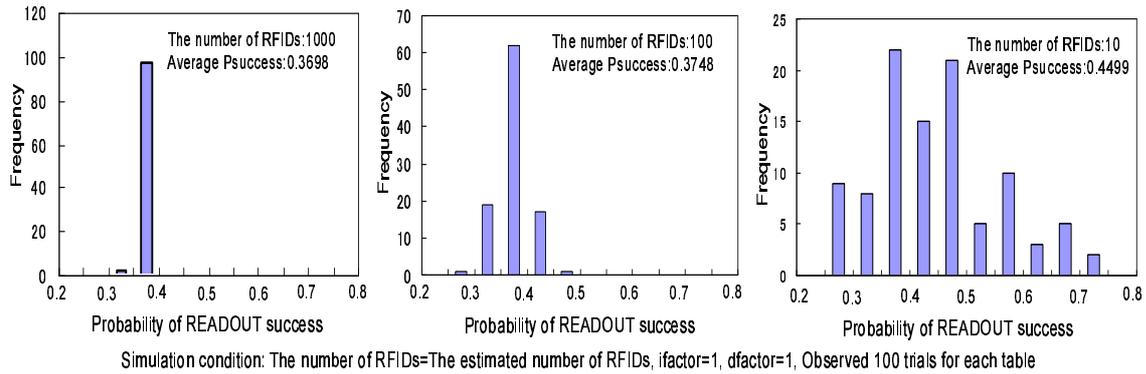


図 8 読み出し成功確率の分布
Fig. 8 Distribution of readout success probabilities

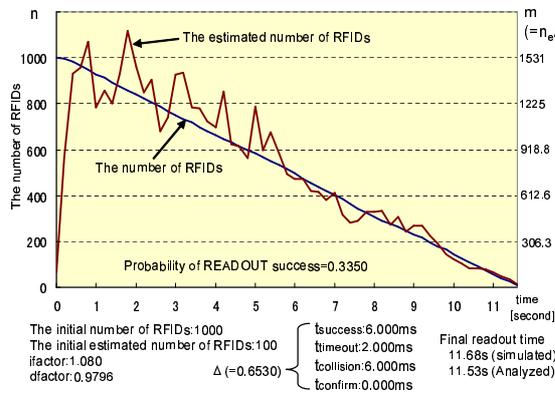


図 9 電子タグ (推定) 数のシミュレーション (例 1)

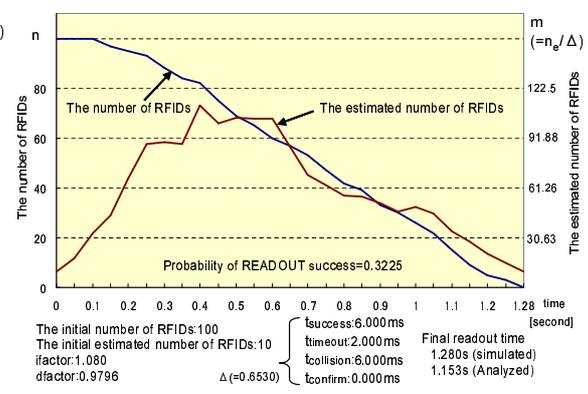


図 10 電子タグ (推定) 数のシミュレーション (例 2)

● 大規模読み出しのシミュレーション

電子タグ数 1000, 初期電子タグ推定数 100 とした大規模な読み出しの場合の電子タグ数と電子タグ推定数のシミュレーション例を図 9 に示す。シミュレーション条件が同じでも乱数初期値の与え方により電子タグ推定数の変化の様子の差は大きかった。電子タグ数は解析通り直線的に減少し、読み出し時間は解析値に近い値が得られた。平均読み出し成功確率は $\frac{1}{e}$ より小さい値となった。

無応答時間寄与率がゼロの場合は、平均読み出し成功確率が $\frac{1}{e}$ に近い値になること、電子タグ推定数が実数に近いことを除いて同じ状況であった。

● 小規模読み出しのシミュレーション

電子タグ数 100, 初期電子タグ推定数 10 とした小規模な場合の電子タグ数と電子タグ推定数のシミュレーション例を図 10 に示す。その他の条件は図 9 と同一である。初期の電子タグ数の推定誤りの影響が途つま

で大きく影響している。小規模な読み出しを繰り返す場合には、初期推定数の精密化、増大係数、減少係数の状況に対応した修正などの対策が必要と考えられる。

● 読み出し成功確率の分布

電子タグ数と電子タグ推定数が一致している場合の読み出し成功確率の分布を図 8 に示す。タイムアウト時間寄与率がゼロの場合を想定し、読み出し成功確率を最大化することを目指したものである。この場合、読み出し成功確率は電子タグ数が小さくなると増大し、 $\frac{1}{e}$ を越える値となる。しかし、同時に成功確率の分散も大きくなる。小規模な読み出しでは状況による読み出し成功確率の差が大きいに注意しなければならない。統計的衝突回避法では避けることのできない特性である。

● 増大・減少係数と読み出し時間

増大・減少係数と読み出し時間の関係例を図 11 に示す。白点は最小読み出し時間を示し、黒線は平衡関係

にある増大係数と減少係数を示す。シミュレーション範囲 ($1.04 < ifactor < 1.16$) では、ある増大係数を決めると平衡関係にある減少係数が最適な組合せであることが分かる。このとき、読み出し時間は 11.64 ~ 11.70 [秒] (約 0.5% 以内の差) に収まっている。

4.3 電子タグ数推定誤差の影響

- 初期推定誤差による読出時間増大

初期推定誤差による読出時間増大の様子を図 12 に示す。各点は推定誤差による読み出し時間増大率 (式 18) の観測値と読み出し時間の観測値をプロットしたものである。

直線の縦軸切片は推定誤りのない場合の読み出し時間であり、式 19 を用いて 1000 から 1 にいたる読み出し時間合計を数値計算し求めた。RPCM の場合、読み出し時間は 11.50 [秒] となったが、電子タグ数が十分大きな場合の近似 (式 10) では 11.53 [秒] であり、28.97ms の補正 ($=\gamma$; 式 16) が必要であった。

DFSA のスロット時間 t_{slot} と読み出し抑制時間 $t_{suppress}$ は識別子応答送信時間相当の 5.000ms とし、RPCM はシミュレーションに用いた値 ($t_{success} = 6.000ms$, $t_{confirm} = 0.000ms$, $\Delta = 0.6530$) を用いた (注: $t_{confirm}$ は読み出し要求と兼用できるため 0.000ms としている)。なお、RPCM に必要な一つの読み出し毎のオーバーヘッド (識別子要求時間を含む)

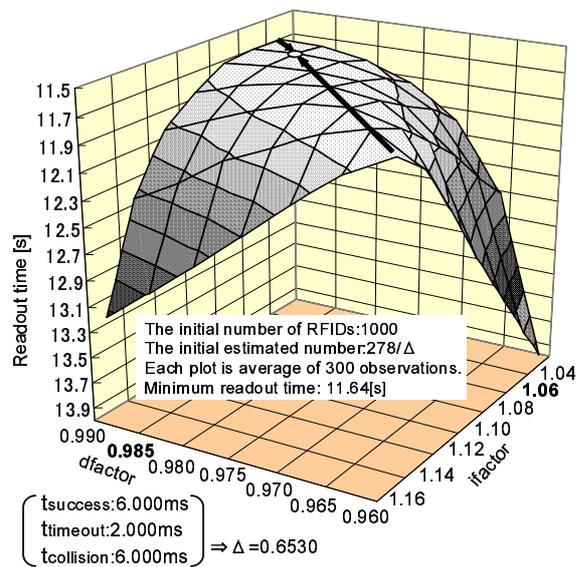


図 11 増大・減少係数と読み出し時間の関係例
Fig. 11 Increase, decrease factors and readout time

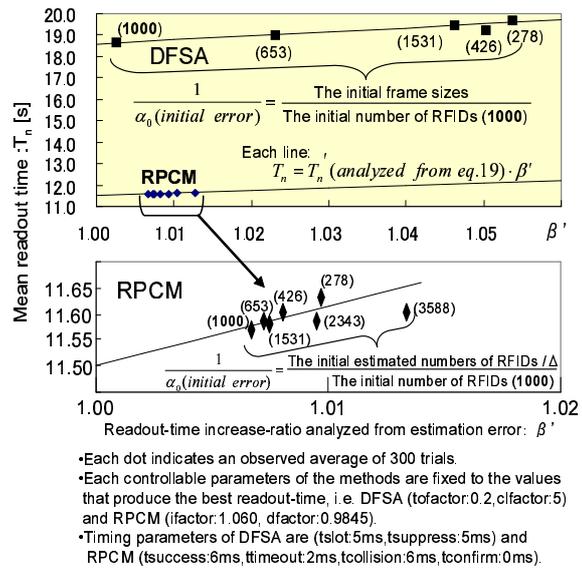


図 12 初期推定誤差による読出時間の増大
Fig. 12 Increase of readout-time caused by initial estimation error

は $t_{success}$ の時間に含まれている (注: $t_{success}$ は t_{slot} , $t_{confirm}$ 時間の 2 割増しである)。

- 近似式 18 の成立範囲

近似式 18 の誤差が影響しない場合、図 12 の各点は線上にのると考えられる。要求される精度により異なるが、シミュレーションから読み取れたこの範囲は DFSA では初期推定数 278 ~ 1531, RPCM では $\frac{278}{\Delta} \sim \frac{2343}{\Delta}$ (何れも実数は 1000) 程度であった。

- DFSA の電子タグ数推定

無応答確率と衝突確率が 0 又は 1 に近いと正確な推定ができない。シミュレーションの様子から、凡そ 0.2 ~ 0.8 が適用可能な推定範囲であった。この場合、実数 1000 の読み出しにおいて、無応答確率を用いた場合の推定数は 228 ~ 1647 の間に、衝突確率を用いた場合の推定数は 845 ~ 3065 の間になければならない (図 5)。図 12 のシミュレーションでは DFSA の電子タグ数推定に無応答確率のみを用いている。このため、電子タグ推定数 (フレームサイズ) が実数よりも大きな所で、急速に推定精度が悪化している。無応答と衝突の確率を組み合わせることにより、適用範囲を拡大できる。

- RPCM における推定の特徴

RPCM で、推定数が大きな場合の読み出し時間が理論値より低くなるのは、読み出し初期の連続したタ

タイムアウトによる．解析(式 18)はこのような偏りを想定していない．RPCM では推定数を大きく設定して使う方が有利である．

- まとめ

式 18 の成立範囲において，RPCM における推定誤りの読み出し時間増大率への影響は DFSA の $\Delta (< 1)$ 倍である．初期推定誤りの読み出し時間増大率への影響も RPCM より DFSA が大きい(図 12)．DFSA では，初期推定誤りの影響が数フレームに収まっても，その時のフレームサイズが大きいため全体に及ぼす影響が大きいこと，小数の読み出しでは読み出し数の統計的変動の影響を受けること，逆に RPCM では推定誤りの影響が局所に留まることによる．なお，初期推定誤りが小さい場合，DFSA は全体にわたり精度良い推定が可能である．

4.4 乱数発生精度について

電子タグは確率的に応答するため，乱数を発生する必要がある．この乱数の精度，ランダム性や発生速度は読み出し性能に影響する重要な課題である．ハード的な乱数発生は今後の課題とし，ここではソフト的な方法について考察する．

電子タグ内の乱数発生精度と読み出し時間の関係(例)を図 13 に示す．この図に示すとおり，最大電子タグ数(この場合，約 10 ビット)より数ビット以上精度の高い乱数を発生する必要がある．因みに，各シミュレーションは 15 ビット精度の乱数を用いている．

ソフト的な乱数発生では同一初期条件，同一確率指定で同じ結果になる場合がある．これを回避してランダム性を与えるため，異なる初期条件(数値)を与える必要があるが，電子タグでは識別子情報を初期条件として利用できる．

なお，DFSA の電子タグも RPCM と同様の乱数発生機能が必要である．但し，RPCM は DFSA に比較し，より高い精度と短い発生間隔が要求される．

乱数の発生速度，精度，ランダム性，実現コストに関しては今後の実装確認が必要である．

5. RPCM と DFSA, FSA の比較

- (1) 不定サイズの属性情報などを含めて読み出す場合でも，DFSA, DSA では各スロットの時間長(即ち，識別子情報の送信時間)は最大サイズに合わせて一定としなければならない．RPCM では情報サイズに合わせて読み出しサイズを逐次変えることができる．
- (2) 不要な読み出しを避けるために，読み出し確

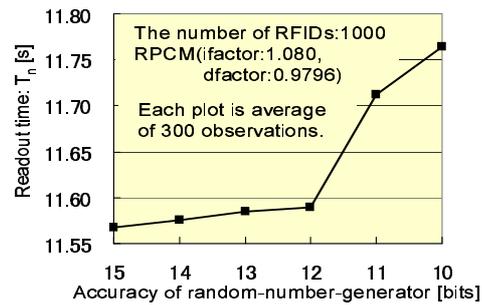


図 13 乱数発生器の精度と読み出し時間の関係
Fig. 13 Readout time vs. Accuracy of random-number-generator

認時間 (RPCM)，読み出し抑制時間 (DFSA) が必要であるが，RPCM では識別子要求と兼用できるため，実質的にゼロとなる．

(3) 応答の無い場合，FSA, DFSA では同期が乱れてしまうためスロットを短縮することはできないが，RPCM ではタイムアウト時間を待って直ぐに次の読み出し要求を出せる．

ここで，電子タグ数 n が十分大きい場合について検証する．この場合，RPCM の読み出し時間(式 10)と DFSA の読み出し時間の比は次式となる．

$$\frac{t_{success}e^{\Delta} + t_{confirm}}{t_{slot}e + t_{suppress}} \quad (21)$$

例えば，電子タグ数推定誤差の影響評価に用いた値(前項の効果を含む)によると，RPCM の読み出し速度は DFSA の 1.613 倍となる．さらに，識別子要求の応答監視時間(1ms)は識別子要求時間(1ms)より短くて済む可能性がある．例えばこれを 10 分の 1 (0.1ms)とした場合， $t_{timeout} = 1.1ms$ となり両方法の速度比は 1.862 倍となる．

(4) RPCM は推定誤りの影響が DFSA より少なく(式 18)，かつ電子タグの初期推定数の誤りが読み出し時間に影響しにくい(図 12)．

(5) 大規模な電子タグの読み出しのため，スロットサイズを大きくすると，読み出し初期における電子タグ数推定誤りによる効率低下やスロット同機外れによる信頼度低下が懸念される．

6. む す び

電子タグの応答確率を制御してその高速な読み出しを実現する RPCM について，解析とシミュレーションによって基本的な特性を明らかにした．読み出し状

況からリーダにおいて応答確率を制御する方法を示し、十分利用できることを示した。ここで検討した電子タグ制御法を用いて、大規模な電子タグの高速読み出しを実現する見通しを得た(物理的な条件を除く)。

既存の読み出し方法である FSA, DFSA に比較し, RPCM は可変長情報の効率的な読み出しが可能である特長を持つ。さらに, 無応答の検出時間が正常読み出し時間より短いことを活かし読み出し速度を向上できること, 識別子が正常に読み出せたことの確認を効率的に行えることの特長を持つ。このため, シミュレーションに用いた条件下では, DFSA の約 1.6 倍の読み出し速度が得られた。

今後, 動きのある電子タグの読み出しなど高度な利用法についての定量的評価を進める予定である。カプリング効果, キャプチャ効果, 乱数発生精度の影響などの実装評価も今後の課題である。

文 献

- [1] K. Finkenzeller, "RFID handbook, second edition," John Wiley & Sons, 2003.
- [2] D.W. Engels, and S.E. Sarma, "The reader collision problem," 2002 IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics (2002 IEEE SMC), Vol.3, Oct.2002.
- [3] J.Waldrop, D.W. Engels, and S.E. Sarma, "Color-wave: an anticollision algorithm for the reader collision problem," IEEE Int. Conf. on Communications 2003 (ICC '03), Vol.2, pp.1206-1210, May 2003.
- [4] V. Pillai, J. Peternel, H. Heinrich, R. Martinez, and K. Rao, "Using volatile state storage for substantial improvement in RFID throughput," Fourth IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies 2005, pp.101-105, Oct.2005.
- [5] M. Jacomet, A. Ehrsam, and U. Gehrig, "Contactless identification device with anticollision algorithm," IEEE Computer Society CSCC99, Conf. on Circuits, Systems, Computers and Communications, Jul.1999.
- [6] H. Vogt, "Efficient object identification with passive RFID tags," Proc. Int. Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2002), pp.98-113, April 2002.
- [7] H.S. Choi, J.R. Cha, and J.H. Kim, "Fast wireless anti-collision algorithm in ubiquitous ID system," Proc. IEEE Vehicular Technology Conf., 2004 (IEEE VTC2004), Vol.6, pp.4589-4592, Sept.2004.
- [8] J.R. Cha, and J.H. Kim, "Novel anti-collision algorithms for fast object identification in RFID system", Proc. of the 2005 11th Int. Conf. on Parallel and Distributed Systems, vol.2, pp.63-67, July 2005.
- [9] T.N. Saadawi, and A. Ephremides, "Analysis, stability, and optimization of slotted ALOHA with a finite number of buffered users," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.AC-26, No.3, pp.680-689, June 1981.

[10] Proximity coupling smart cards, ISO/IEC 14443-3, 2001.

[11] Identification cards - Contactless integrated circuit(s) card, ISO/IEC 15693-3, 2001.

(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)



中野 博隆 (正員)

昭 47 東京大学・工・電気卒。昭 52 同大・大学院博士課程了。工学博士。同年日本電信電話公社(現 NTT) 武蔵野通研入所。以来, 画像システムの研究開発に従事。平 11 NTT 移动通信網株式会社(現, NTT ドコモ) マルチメディア研究所入所。平 16 大阪大学サイバーメディアセンター教授。ユビキタス環境におけるネットワーク基盤の研究に従事。



長手 航

平 17 阪大基礎工情報卒同年同大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻入学。ユビキタスネットワーク, 電子タグに関する研究に従事。



平野 裕介

平 17 阪大基礎工情報卒同年 同大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻入学。ユビキタスネットワークの特性に関する研究に従事。



笹部 昌弘 (正員)

平 13 阪大・基礎工・情報卒。平 15 同大学院博士前期課程修了。平 16 同大学院博士後期課程退学。平 15~16 まで日本学術振興会特別研究員。平 16 より同大サイバーメディアセンター助手。平 18 同大論文博士(情報科学)取得。P2P ネットワーク, ユビキタスネットワークに関する研究に従事。

Abstract This paper proposes a novel RFID readout method RPCM; Response Probability Control Method, which enables fast batch-readout of many RFIDs. When a request of a reader is responded by only one RFID, the request is successful, otherwise in failure. In case RPCM, response probability to a request is indicated by the reader, request by request. This guarantees fast and simultaneous readout of many RFIDs. Basic RPCM characteristics are analyzed and simulated, without RFID production. RPCM and existing methods FSA/DFSA (Framed Slotted ALOHA/Dynamic FSA) are compared. It is shown by simulation that RPCM enables 60% faster readout compared to DFSA.

Key words RFID, reader, fast readout, probability control, FSA