2008年度(平成20年度)慶應義塾大学政策・メディア研究科修士論文

大量RF タグの効率的なエミュレーション

Keio University



慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科 神谷 尚保

修士論文 2008 年度(平成 20 年度)

大量 RF タグの効率的なエミュレーション

論文要旨

大量 RF タグの読み取りや,繰り返しによる読み漏らし防止の目的で RFID 読み取りの高 速化が求められている.特に長距離通信かつ,大量のRFタグを読み取ることが要求される UHF帯 RFID ではこの要望が強く,多くの高速 MAC プロトコルが提案されている.通常, MAC プロトコルの実測による性能評価は複数の RF タグを読み取ることで行われる、この 場合,複数のRF タグを並べる空間や手間が必要となる.さらに,各RF タグの特性の違い, RF タグの配置方法, RF タグ間の間隔, 電波伝搬環境等の物理層の要因によって読み取り速 度が変化するため,物理層の影響を受けないように,リーダ/ライタ全体の性能から MAC プロトコルの性能のみを切り出して,MAC プロトコルの性能を共通の基準で評価すること が困難である.この問題は複数の RF タグのプロトコル動作を模擬するエミュレータによっ て解決できる.1台のエミュレータハードウェアでより多くのRFタグを模擬するため,本論 文では, MAC プロトコルの確率的特性に着目し, エミュレーション精度重視と計算効率重 視の2つの複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズムを提案する.2 つのアルゴリズ ムのエミュレーション精度と計算効率に関する基本的特性は数値計算によって確認し,8bit MPU を有するプログラマブル電池付きパッシブタグ(BAP)に実装して定量評価を行った. その結果,最適な実装方法の提案により,若干のエミュレーション精度の誤差で1000個以上 の RF タグを1台の BAP でエミュレーションできることが明らかとなった. さらに,本論 文では,複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズムに電波特性によって引き起こさ れるキャプチャ効果(複数の RF タグのアクセス要求が衝突しても電力差によりアクセスが 成功する現象)の影響を含めたエミュレーションアルゴリズムを提案する.これにより,任 意環境下での物理層の影響を加味した読み取り速度の評価・予測も可能となる.

キーワード

1: <u>RFID</u> 2: <u>UHF</u> 3: 複数 RF タグエミュレーションアルゴリズム 4: <u>BAP</u>

5: リーダ / ライタ性能評価 6: C1G2 プロトコル 7: キャプチャ効果

慶應義塾大学 政策・メディア研究科 神谷 尚保

Efficient Emulation of A Large Number of RF Tags

Summary

UHF band passive RFID is an essential automatic identification technology for pervasive computing because low-cost passive RF tags can be simultaneously identified by an interrogator in a few meters distance. There are many UHF band passive RFID projects for adopting item-level-tagging, for example books and consumer electronics. For this reason, there exist industrial demands for the interrogator capable of reading multiple RF tags faster and more accurately. Interrogator's reading speed depends on MAC layer (MAC protocol performance of an interrogator) and PHY layer (radio propagation environment, antenna pattern of RF tag, position of RF tags, etc). Because interrogator's reading speed is fundamentally determined by MAC protocol, many high-speed MAC protocols have been proposed thus far. Whereas MAC protocol performance of an interrogator is usually evaluated by measuring its interrogation speed of actual RF tags, such traditional method entails a burden for laying out many RF tags. Moreover, it is hard to eliminate the influence of PHY layer elements when evaluating interrogator's MAC protocol performance. In this paper, I propose two efficient multiple RF tag MAC emulation algorithms which leverage the probabilistic nature of MAC protocol. I have evaluated the algorithms implemented onto an 8bit MPU in a programmable battery assisted passive tag (BAP). It was revealed, both by numerical simulation and experiments, that the algorithm can efficiently and accurately emulate the MAC behavior of actual RF tags. Novel implementation techniques also enable a BAP to emulate more than 1000 RF tags, virtually limit-less with a trivial penalty on accuracy. Furthermore, I proposes multiple RF tag emulation algorithm improved by including capture effect that an access succeeds by the electric power difference even if the access requests from multiple RF tags collide. With the propose method, we can evaluate/forecast interrogator's reading speed including PHY layer.

Key Word

1: <u>RFID</u> 2: <u>UHF</u> 3: Multiple RF tags emulation algorithm 4: <u>BAP</u>

5: Interrogator's performance evaluation 6: C1G2 protocol 7: Capture effect

Keio University Graduate School of Media and Governance Naoyasu KAMIYA

目 次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
	1.1.1 アイテムレベルタギングの出現	1
	1.1.2 RFID 高速読み取り研究の活性化	2
	1.1.3 高速 MAC プロトコルの評価の困難性	3
	1.1.4 RFID システムの 設計・構築の困難性	4
1.2	研究の目的	4
1.3	用語の定義・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
1.4	本論文の構成	5
第2章	効率的な複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズムの提案	6
2.1	既存研究の調査.................................	6
	2.1.1 upper-layer protocol emulator	6
	2.1.2 UHF RFID Tag emulator	6
	2.1.3 既存研究の調査結果のまとめ	6
2.2	複数の RF タグのステートマシンを保持する単純なアルゴリズムの実現手法	
	とその問題点	7
2.3	1 つのステートマシンで複数 RF タグのエミュレーションを実現する手法	8
2.4	提案アルゴリズム1:従属試行モデル(エミュレーション精度重視モデル).	9
2.5	提案アルゴリズム2:独立試行モデル(計算効率重視モデル)......	10
2.6	本章のまとめ	11
第3章	数値シミュレーションによる複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズ	
	ムの性能評価	12
3.1	エミュレーション精度の評価..........................	12
	3.1.1 Success スロットの割合を評価軸としたエミュレーション精度の評価.	12
	3.1.2 インベントリ所要スロット数を評価軸としたエミュレーション精度の	
	評価	13
3.2	計算効率の評価	15
3.3	本章のまとめ	16
第4章	複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズムの BAP への実装	17
4.1	BAP の概要	17
4.2	エミュレーションできる RF タグの最大数を決める要因........	18
4.3	実装上の工夫案1:計算効率化モデル.....................	18
	4.3.1 計算効率化モデルの実現方法	18

	4.3.2 計算効率化モデルにおけるエミュレーションできる RF タグの最大数	
	の評価	21
	4.3.3 複数台の BAP を使用してのエミュレーションの可否の確認	22
4.4	実装上の工夫案 2 :SRAM モデル	23
	4.4.1 SRAM モデルの実現方法	23
	4.4.2 SRAM モデルにおけるエミュレーションできる RF タグの最大数の評価	24
4.5	本章のまとめ	25
第5章	実装による複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズムの性能評価	26
5.1	エミュレーションできる RF タグの最大数の評価...........	26
5.2	実装によるエミュレーション精度の評価	26
	5.2.1 エミュレーション精度の評価方法	27
	5.2.2 計算効率化モデルにおけるエミュレーション精度の評価	27
	5.2.3 SRAM モデルにおけるエミュレーション精度の評価	28
5.3	C1G2 プロトコル対応リーダ / ライタでの動作確認	29
5.4	提案アルゴリズムによる市販リーダ / ライタの MAC プロトコル性能評価	31
5.5	本章のまとめ	35
第6章	電波特性を含めた複数 RF タグエミュレーション手法の提案	36
6.1	複数 RF タグを並べた場合とエミュレータの差の検証	36
	6.1.1 検証実験1:電波暗箱環境における比較実験	36
	6.1.2 検証実験2:室内環境における比較実験	40
	6.1.3 検証実験3:BAPの多元接続数を変えて比較	43
	6.1.4 キャプチャ効果	46
6.2	キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムの提案	46
6.3	キャプチャ率と希望干渉比の関係のグラフと RSSI の確率密度分布からのキャ	
	プチャ率算出手法の提案	47
	6.3.1 キャプチャ率と希望干渉比の関係のグラフの作成手法	47
	6.3.2 RSSIの確率密度分布の作成手法	50
	6.3.3 キャプチャ率と希望干渉比の関係のグラフと RSSI の確率密度分布か	
	らのキャプチャ率算出手法...........................	51
6.4	本章のまとめ	52
第7章	電波特性を含めた複数 RF タグエミュレーション手法の評価	53
7.1	数値シミュレーションによるエミュレーション精度の評価	53
	7.1.1 インベントリ所要スロット数の平均値を評価軸としたエミュレーショ	
	ン精度の評価	53
	7.1.2 インベントリ所要スロット数の累積確率分布を評価軸としたエミュレー	
	ション精度の評価.............................	54
7.2	実装によるエミュレーションできる RF タグの最大数の評価	57
7.3	複数 RF タグとの比較評価	57
	7.3.1 電波暗箱環境での比較評価	57
	7.3.2 室内環境での比較評価	59

$7.4 \\ 7.5$	提案ア 本章の	ルゴリズムによる電波特性も含めた読み取り速度の評価・予測方法 まとめ	$\begin{array}{c} 61 \\ 63 \end{array}$
第8章 8.1 8.2	結論と 結論 今後の 8.2.1 8.2.2 8.2.3	今後の課題 課題 Phase1 : Moving RF Tag Emulation Phase2 : Virtusl RFID Portal	65 66 66 66 67
謝辞			69
参考文南	ť		70
付録A	C1G2	プロトコルにおけるインベントリ手順	73
付録B	仲上-ラ	ライスフェージング環境における衝突 RF タグ数とキャプチャの関係	75

図目次

$1.1 \\ 1.2 \\ 1.3$	家電製品のライフサイクルマネージメントの実現イメージ 複数 RF タグの読み取りの様子 高速 MAC プロトコルのインベントリ速度の計測実験の様子	2 2 3
$2.1 \\ 2.2$	RF タグのステートマシンの例............................ マルチステートマシンモデルと提案アルゴリズムの比較..........	79
3.1 3.2 3.3	Success スロットの割合を評価軸としたエミュレーション精度の評価..... インベントリ所要スロット数を評価軸としたエミュレーション精度の評価.. アルゴリズムの計算処理時間の比較.................	13 15 16
$\begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \\ 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \end{array}$	BAPの概観	 17 18 19 20 21 24
$5.1 \\ 5.2 \\ 5.3 \\ 5.4 \\ 5.5 \\ 5.6 \\ 5.7 \\ 5.8 \\ 5.9 \\$	エミュレーション精度の評価(計算効率化モデル)	27 28 29 30 31 32 33 34 35
6.16.26.3	検証実験1の実験装置概略図.30 個の RF タグの読み取りにおけるインベントリ毎の読み取り RF タグ数(電 波暗箱環境)	36 37 38
6.4 6.5 6.6	検証実験1の実験図 複数 RF タグを並べた場合とエミュレータ使用におけるインベントリ毎の読 み取り RF タグ数の比較(電波暗箱環境) 複数 RF タグを並べた場合とエミュレータ使用におけるインベントリ所要ス	38 39
0.0	ロット数の比較(電波暗箱環境) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	40

6.7	検証実験2の概観	11
6.8	30 個の RF タグの読み取りにおけるインベントリ毎の読み取り RF タグ数 (室	
	内環境)	11
6.9	複数 RF タグを並べた場合とエミュレータ使用におけるインベントリ毎の読	
	み取り RF タグ数の比較(室内環境)	12
6.10	複数 RF タグを並べた場合とエミュレータ使用におけるインベントリ所要ス	
	ロット数の比較(室内環境)4	43
6.11	BAP を有線で読み取る場合の実験装置概略図	14
6.12	BAP を有線で読み取る場合の実験図	14
6.13	BAP を無線で読み取る場合の実験図	15
6.14	BAP の多元接続数を変えた比較評価	15
6.15	キャプチャの影響を含めた独立試行モデルでのスロットの状態決定の仕組み	17
6.16	キャプチャ率実測の実験装置概略図	18
6.17	Programmable Attenuator (MICRONIX MAT800)の概観	18
6.18	Attenuator (Agilent 8494B, 8495B)の概観	19
6.19	実測したキャプチャ率と希望干渉比の関係	50
6.20	RSSIの確率密度分布の例	51
6.21	キャプチャ率算出手法	51
7.1	インベントリ所要スロット数の平均値を評価軸としたエミュレーション精度	
	の評価	54
7.2	インベントリ所要スロット数の累積確率分布を評価軸とした従来モデルのエ	
	ミュレーション精度の評価	55
7.3	インベントリ所要スロット数の累積確率分布を評価軸としたキャプチャの影	
	響を含めたモデルのエミュレーション精度の評価($Pc = 0.25$)	56
7.4	インベントリ所要スロット数の累積確率分布を評価軸としたキャプチャの影	
	響を含めたモデルのエミュレーション精度の評価 ($Pc = 0.5$)	56
7.5	RSSIの確率密度分布(電波暗箱環境)	58
7.6	キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムにおけ	
	る複数 RF タグを並べた場合とのインベントリ所要スロット数の比較(電波	
	暗箱環境)	59
7.7	RSSIの確率密度分布(室内環境)	30
7.8	キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムにおけ	
	る複数 RF タグを並べた場合とのインベントリ所要スロット数の比較(室内	
	環境)	31
7.9	無線伝搬環境と有線(アッテネータの減衰量を調節)のインベントリ所要ス	
	ロット数の比較	32
7.10	電波特性を含めたインベントリ速度の予測結果	33
0.1		
8.1	Moving RF Tag Emulation の実現イメーシ	56
8.2	Virtual RFID Portal の実現イメージ	57
8.3	Virtual RFID System の実現イメージ	58
A 1	C1G2 プロトコルにおけるインベントリ例 5	73
* * • T		0

B.1	正規化した RF タグからの受信電力の確率密度関数 (PDF) と累積分布関数	
	(CDF)の例	76
B.2	2 つ以上の干渉波のパケットが希望波のパケットに衝突する場合の PDF およ	
	び CDF のグラフ	77

表目次

4.1	各フレームサイズにおけるエミュレーションできる RF タグの最大数	22
5.1	リーダ / ライタの伝送速度を変化させた場合のエミュレーションできる RF タ	
	グの最大数の評価....................................	26
6.1	Programmable Attenuator (MICRONIX MAT800)の仕様	49
6.2	Attenuator (Agilent 8494B, 8495B) の仕様	49

第1章 序論

本章では、本研究の背景、および目的について述べる.また、本論文の構成を示す.

1.1 研究の背景

本節では,本研究の背景について述べる.

1.1.1 アイテムレベルタギングの出現

RFID (Radio Frequency IDentification)は情報空間と実空間を結びつけるための仕組みの1つである. RFID はその利便性の高さから,家電業界[2],航空業界[3],出版業界[4],食品業界[5],医療業界[6]など様々な業界に利用が拡大している.

現在, RFID は各業界において, パレットレベルやケースレベルでの RF タグの貼付が主流 となっている. SCM (Supply Chain Management:流通管理)における検品時間を短縮して, 業務を効率化することが狙いである.

一方で,将来は,RFタグ単価の低コスト化やリーダ/ライタの高性能化からアイテムレベルのRFタグの貼付が主流になっていくことが期待されている.特に,家電業界では,家 電製品の製造から廃棄までの長期的なマネージメントを行っていきたいという要求から,ア イテムレベルのRFタグの貼付に注力している[7].これは,RFタグのIDと購入者が統一的 に管理され,有事の場合にはリコール情報を直接,消費者へと届けられる仕組みである.ま た,リサイクルや廃棄のように製品が所有者の手元を離れてしまう場合には,それぞれ廃棄 やリサイクルされたという情報をデータベースに記録しておき,リコール時に行方不明では なく,正確に処分されていることを知ることができる.さらに,リサイクル時においても,製 品それぞれについているRFタグを読み取ることにより,含まれている有害物質や希少資源 といった情報を得てリサイクル事業に役立てることができると見込まれている.家電製品の ライフサイクルマネージメントの実現イメージを図1.1に示す.

このようなアイテムレベルの RF タグ貼付を実現する場合,パレットレベルやケースレベルで RF タグ貼付を行う場合と比較して,より多数の RF タグを一括して読み取ることが必要となる.具体的には,最大で1000 個程度の RF タグを一括して読み取ることが必要となる[8].



図 1.1: 家電製品のライフサイクルマネージメントの実現イメージ

1.1.2 RFID 高速読み取り研究の活性化

UHF帯 RFID は,読み取り領域が従来の RFID と比較して広範囲(数m程度)に及ぶ特性から,多数の RF タグの一括読み取りを実現する技術として期待されている.この際,複数の RF タグの読み取り(インベントリ)の高速化が,リーダ/ライタの性能評価軸として重要である.単純に大量の RF タグを読むこと(図1.2(a))や,高速ベルトコンベアのように読み取り領域を短時間で通過してしまう RF タグを読み取るということ(図1.2(b))と同時に,読み取りサイクル数を増やして確実に読み取る,ことが狙いである.



(a) Reading many RF tags



(b) Reading RF tags which are carried on belt conveyor

図 1.2: 複数 RF タグの読み取りの様子

インベントリ速度は, MAC 層 (リーダ / ライタの読み取り MAC プロトコル)と物理層 (電波伝搬環境, RF タグの特性, RF タグ間の間隔, RF タグの配置方法等)の2つの要素で 決まる. このうち,インベントリ速度の主要な部分は MAC プロトコルの性能で決まるため, アンチコリジョンが重要である. RFID におけるアンチコリジョンは,大きく分けて,フレー ム ALOHA 方式とバイナリツリー方式に分類できる [9] が,本論文では UHF 帯 RFID の代 表的な無線通信プロトコルで用いられているフレーム ALOHA 方式を対象とする.

現在, フレームサイズを RF タグの数に応じて動的に変化させる動的フレーム ALOHA 方式によってインベントリ速度を高速化する,高速 MAC プロトコルの研究が盛んに行われている [10][11][12].

1.1.3 高速 MAC プロトコルの評価の困難性

現段階の高速 MAC プロトコルの研究では,まだ数値シミュレーションによる評価が多いが,研究開発した高速 MAC プロトコルを実際に使う場合には,複数の RF タグを読み取ってインベントリ速度を計測・比較することになる [12].高速 MAC プロトコルのインベントリ速度の計測実験の様子を図 1.3 に示す.



図 1.3: 高速 MAC プロトコルのインベントリ速度の計測実験の様子

この場合,複数の RF タグを並べる空間や手間が必要となる.さらに,各 RF タグの特性の違い, RF タグの配置方法, RF タグ間の間隔,電波伝搬環境等の物理層の要因によってインベントリ速度が変化するため,物理層の影響を受けないように,リーダ/ライタ全体の性

能から MAC プロトコルの性能のみを切り出して,MAC プロトコルの性能を共通の基準で 評価することが困難である.

1.1.4 RFID システムの設計・構築の困難性

大量 RF タグの読み取りを想定した RFID システムの設計・構築では,実際に大量の RF タグを並べて読み取りを行い,実現性の検証をする必要がある.今後,アイテムレベルタギ ングが普及していく場合,RFID システムでは従来よりもより多数の RF タグを読み取る必 要が出てくる.これに伴い,RF タグを並べる手間と時間が増大していくことが予想される.

1.2 研究の目的

本研究では,大量 RF タグの読み取り速度を簡単に評価するために,複数 RF タグの挙動を エミュレーションする方法を提供することを研究の目的とする.本研究の目的は,以下の2 つに細分化される.

- 1. リーダ / ライタの高速 MAC プロトコルの評価方法の提供
- 2. 電波特性も含めた読み取り速度の評価・予測方法の提供

1.3 用語の定義

本論文で用いる用語とその定義を以下に示す.

• RFID

JIS X0500 データキャリア用語 [13] によると, RFID (Radio Frequency IDentification) は「誘導電磁界又は電波によって非接触で半導体メモリのデータを読み出し,書き込 みのために近距離通信を行うものの総称」と定義されている.近距離通信の構成要素 はRF タグとリーダ / ライタである.さらにRF タグは「自らデータを送信する機能を 備えているアクティブタグ」と「リーダ / ライタから送られてきた搬送波の電力を利 用して送信する機能を備えているパッシブタグ」に分けられる.本論文でも,この用 語および分類を用いる.

• インベントリ

本論文では,読み取り領域にある複数 RF タグの読み取りのことをインベントリと定 義する.

• MAC プロトコル

各リーダ / ライタが用いているフレーム ALOHA 方式に基づいたアルゴリズムのこと を(リーダ / ライタの) MAC プロトコルと定義する. インベントリの高速化に注力し ないリーダ / ライタは,フレームサイズを常に固定する静的フレーム ALOHA 方式, インベントリの高速化に注力するリーダ / ライタは,次フレームサイズを残 RF タグ の数に応じて調節する動的フレーム ALOHA 方式を MAC プロトコルに用いている.

• BAP

Auto-ID Lab. Japan で開発している, プログラマブル電池付きパッシブタグ (programmable Battery Assisted Passive tag) [14] の略称である.

1.4 本論文の構成

本論文は本章を含め全8章より構成される.

本章である第1章では,本研究の背景および目的について述べた.第2章では,MACプロ トコルの確率的特性を考慮することによって,1つのステートマシンだけで複数RFタグの エミュレーションを行えることを示し,2つの複数RFタグMACエミュレーションアルゴ リズムを提案する.第3章では,RFタグ数分のステートマシンを持つアルゴリズムと提案 する2つのアルゴリズムをエミュレーション精度と計算効率の観点で数値シミュレーション によって定量評価する.第4章では,8bit MPUを有するプログラマブル電池付きパッシブ タグ(BAP:programmable Battery Assisted Passive tag)への提案アルゴリズムの実装につ いて述べる.第5章ではBAPへの実装により実現性の検証と性能評価を行った結果につい て述べる.第6章では,2章で提案した複数RFタグMACエミュレーションアルゴリズム に電波特性によって引き起こされるキャプチャ効果の影響を含めた新たなエミュレーション アルゴリズムを提案する.第7章では,キャプチャ効果の影響を含めたエミュレーションア ルゴリズムを数値シミュレーションおよびBAPへの実装によって定量評価した結果につい て述べる.最後に第8章では,本研究を総括した全体的な結論と今後の課題を述べる.

第2章 効率的な複数RFタグMACエミュ レーションアルゴリズムの提案

本章では,まず既存研究の調査結果について述べる.次に,複数のRF タグのステートマシンを保持する単純な複数RF タグMAC エミュレーションアルゴリズムの実現手法とその問題点について述べる.その後,1つのステートマシンで複数RF タグのMAC プロトコルの動作をエミュレーションする原理を説明し,エミュレーション精度重視,計算効率重視の2つの複数RF タグMAC エミュレーションアルゴリズムを提案する.

2.1 既存研究の調査

本節では,1台のハードウェア機器で複数 RF タグのプロトコル動作を模擬する,複数 RF タグエミュレータの有無に関して既存研究を調査した結果を述べる.

2.1.1 upper-layer protocol emulator

RF タグではないが,1台のハードウェア機器で複数の機器のプロトコル動作を模擬するエ ミュレータは存在する.Wangらは,複数のSDR(Software Defined Radio)機器のプロトコ ル動作を模擬する upper-layer protocol emulator[15]を開発している.upper-layer protocol emulator では,エミュレーションしたいSDR機器の数だけステートマシンを実装すること で,ワイアレスSDRネットワークにおいて複数のSDR機器のプロトコル動作をエミュレー ションすることができる.

2.1.2 UHF RFID Tag emulator

RF タグのエミュレータに関しては, Redemske らの UHF RFID Emulator[16] がある. し かしながら, UHF RFID emulator は, 1 個の RF タグの動作を受信電力測定などの機能を 加えて模擬することを目的としており, 複数の RF タグのプロトコル動作を模擬することは できない. また, RF タグのエミュレータは, 他にもペリテック社が開発したエミュレータ [17] や Auto-ID Lab. Japan で開発しているプログラマブル電池付きパッシブタグ(BAP) [14] が存在するもののいずれのエミュレータでも複数の RF タグのプロトコル動作を模擬す ることは実現していない.

2.1.3 既存研究の調査結果のまとめ

既存研究の調査から, RF タグではないが, 複数の機器のプロトコル動作を模擬するエミュレータは存在することが確認できた.一方で, RF タグのエミュレータに関しては, 1 個の

RF タグの動作を模擬するエミュレータは存在するものの複数の RF タグのプロトコル動作 を模擬するエミュレータは存在しないことが確認できた.

2.2 複数の RF タグのステートマシンを保持する単純なアルゴリズ ムの実現手法とその問題点

RF タグは, 例えば図 2.1 に示すステートマシンを保持することでフレーム ALOHA 方式に 基づく MAC プロトコル* に対応している.



図 2.1: RF タグのステートマシンの例

したがって,複数RFタグエミュレータは,単純には upper-layer protocol emulator をRF タグに応用して,エミュレーションしたいRFタグの数だけRFタグのステートマシンをエ ミュレータに実装し,高速で演算することで実現できると考えられる.このエミュレーショ ンしたいRFタグ数分だけステートマシンを保持する単純なアルゴリズムを以降,マルチス テートマシンモデルと示す.マルチステートマシンモデルでは,それぞれのステートマシン が独立にフレーム内の1スロットを乱数で選択して応答を返す.

単純には、マルチステートマシンモデルを高性能なエミュレータ機器に実装することで、複数 RF タグエミュレータを実現できる.しかしながら、ハードウェアの処理能力だけで全て 解決することには以下の3つの問題がある.

• コスト

^{*}定量評価のため、UHF帯 RFID でよく用いられる EPCglobal Class-1 Generation-2 protocol[1](以降, C1G2 プロトコルと示す.同仕様は ISO/IEC 18000-6 Type C[18] でもある)を MAC プロトコルとして用いる(付録 A).

エミュレータ機器の性能に応じて,エミュレータ個体の機器コストがかかる.また, RFIDの変復調回路および,複数の市販リーダ/ライタとの接続性が検証済みのステー トモデルを有し,かつプログラマブルであるエミュレータ機器は,Auto-ID Lab. Japan で開発しているプログラマブル電池付きパッシブタグ(BAP)だけである.したがっ て,BAPをエミュレータ機器に使用せず,BAPの性能を超えるエミュレータ機器を必 要とする場合,新たに初期開発コストが必要になる.

表面積・消費電力

エミュレータ機器は小型かつ電池でも駆動できることが望ましい. エミュレータをモノ に貼り付けて評価したり, エミュレータをベルトコンベア等で動かしながら評価する ことも可能になるからである. 高性能なエミュレータでは,機器の大型化と電気エネル ギーの増加を招き,上記を実現することが非常に困難となる.

拡張性

本研究では,大量 RF タグのインベントリ速度を簡単に評価することを研究の目的としている.しかしながら,インベントリの性能には,読み取り率や読み取り可能な距離といった別の指標での評価も必要であり,本研究成果はこれらの評価を行うための拡張の容易性があることが望ましい.これらの評価を行うために拡張を行う際,インベントリ中に MAC プロトコルの模擬とは別の計算を行ったり,受信信号強度の測定を行うなど新たな計算資源が必要になると考えられる.この場合,仮に膨大な開発コストをかけて新たに最高性能のハードウェア機器を製作したとしても,要求を満たせない可能性がある.したがって,拡張を容易にするためには,可能な限り複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズムの計算負荷を抑える必要がある.

上記のように,ハードウェアの処理能力で全てを解決する場合,様々な問題が発生する.一方で,効率的なエミュレーションアルゴリズムが実現できた場合,既存のハードウェア機器で多数のRFタグのエミュレーションができるだけでなく,新たに高性能なハードウェア機器を製作してアルゴリズムを実装した場合には,MACプロトコルの模擬とは別の更なる要求も満たせるようになる.

2.3 1つのステートマシンで複数 RF タグのエミュレーションを実現 する手法

2.2 節で述べた,単純なアルゴリズムを高性能なエミュレータ機器に実装してハードウェア の処理能力のみで複数 RF タグエミュレータを実現する非効率性を解決するために,MAC プ ロトコルの確率的特性を考慮することによって,1つのステートマシンで複数の RF タグのエ ミュレーションをする手法を提案する [19].これにより複数 RF タグエミュレータに要求され るハードウェア性能を引き下げ,同じハードウェアでより多くの RF タグのエミュレーショ ンを実現することができる.提案アルゴリズムでは,1つのステートマシンを用いて,RF タ グ数,フレームサイズから,あるスロットにおいて Empty (RF タグが 1 つも応答しない状 態)となる確率 E,Success (RF タグが 1 つだけ応答する状態)となる確率 S,Collision (複 数の RF タグが応答する状態)となる確率 C を求める.そして,各スロットにおいてこれら の確率と0~1の範囲で発生させた乱数 R^{\dagger} を比較することで,そのスロットの状態(Empty, Success, Collision)を決定する.具体的には,乱数 R が R = E の範囲にある場合はEmpty, E < R = (E+S)の範囲にある場合はSuccess,それよりも大きな値の場合はCollisionであ ると判定する.こうして決定された状態に応じて,リーダ/ライタに応答を返す. マルチステートマシンモデルと提案アルゴリズムの比較を図 2.2 に示す.



図 2.2: マルチステートマシンモデルと提案アルゴリズムの比較

2.4 提案アルゴリズム1:従属試行モデル(エミュレーション精度重 視モデル)

複数の RF タグがそれぞれ乱数でスロットを選択している場合と同様のスロットの選択状況を正確につくり出すためには,前のスロットが Empty か Success か Collision かによって,次のスロットの確率の値を変化させる必要がある.この原理に基づいたエミュレーションアルゴリズムを従属試行モデルと呼ぶ.式(2.1)にスロット*i*における確率 E,S および *a* 個の RF タグが Collision する確率 C_a [‡]を示す.ここで,*L*はフレームサイズを表し,*n*はフレーム内でまだ応答していない RF タグの数を表している.スロット*i* が Success の場合は*n* から1 を減算し,スロット*i* が Collision の場合は*n* からスロット*i*で衝突している RF タグ数を減算する.

$$E = (1 - \frac{1}{L - i})^{n}$$

$$S = {}_{n}C_{1}(1 - \frac{1}{L - i})^{n-1}(\frac{1}{L - i})$$

$$C_{2} = {}_{n}C_{2}(1 - \frac{1}{L - i})^{n-2}(\frac{1}{L - i})^{2}$$

$$\vdots$$

$$C_{n} = {}_{n}C_{n}(1 - \frac{1}{L - i})^{n-n}(\frac{1}{L - i})^{n}$$
(2.1)

従属試行モデルでは,このように各スロットで確率の計算を行い,その計算結果と乱数 R を比較することでスロットの状態を決定して,リーダ/ライタに応答を返す.

^{*}実装上では整数演算で実施

2.5 提案アルゴリズム2:独立試行モデル(計算効率重視モデル)

従属試行モデルでは,保持するステートマシンを1つにして計算を効率化しつつ,複数 RF タグの応答と実質的に同一な応答を行うことが可能である.しかし,従属試行モデルにおけ る確率の計算処理は計算負荷が大きい.そこで,確率の計算処理を簡素化し,多少エミュレー ション精度を犠牲しながらもエミュレーションできる RF タグの数を増やす独立試行モデル を提案する.独立試行モデルでは,以下の2つの特徴がある.

- 1. 各フレームにおいて最初のスロットでのみ確率計算を行い,最初のスロット以外のス ロットでは,最初のスロットで計算した確率の値を用いる
- 2. Collision 判定の際に Collision している RF タグ数を計算せず Collision 数を決定論的 に決定する

独立試行モデルでは,各スロットにおいて確率E,S,Cは,

$$E = (1 - \frac{1}{L})^{n}$$

$$S = {}_{n}C_{1}(1 - \frac{1}{L})^{n-1}(\frac{1}{L})$$

$$C = 1 - E - S$$
(2.2)

となる.このままでは、フレーム内の乱数の状況によっては、フレーム内において、残RF タグ数よりも多い数のRF タグが応答してしまったり、残RF タグ数よりも少ない数のRF タ グしか応答しないことが発生しうる.そこで、独立試行モデルでは、できる限り計算負荷が 少ない処理でこれらの問題の解決を図る.フレーム内でまだ応答していないRF タグの数を 表す変数 n に対して、Success になった場合はn を 1 減算、Collsion になった場合はn を 2 減 算する.そして、n が 1 になった場合は、乱数 R が Collision の範囲にあってもそのスロット を Success と扱い、n が 0 になった場合は、乱数 R に関係なく以降のスロットを全て Empty とする.また、フレーム内の最後のスロットにおいて、n が 1 の場合は、乱数の値に関係な く Success、n が 2 以上の場合は、乱数の値に関係なく Collision とする.

上記をまとめると以下のようになる.

- 1. if Success, decrement n by 1.
- 2. if Collision, decrement n by 2.
- 3. if Collision and n is 1, Collision is Success.

4. if n = 0, then Empty.

- 5. if a slot is the last in a frame,
 - (a) if n = 1, then Success.
 - (b) if $n \geq 2$, then Collision.

2.6 本章のまとめ

本章では,1つのステートマシンで複数 RF タグの MAC プロトコルの動作をエミュレー ションする,エミュレーション精度重視の従属試行モデルと,計算効率重視の独立試行モデ ルの2つの複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズムを提案した.次章では,従属 試行モデルおよび独立試行モデルに対して行った数値シミュレーションについて述べる.

第3章 数値シミュレーションによる複数RFタ グMACエミュレーションアルゴリズ ムの性能評価

本章では,従属試行モデルと独立試行モデルのエミュレーション精度と計算処理時間を数値 シミュレーションによりマルチステートマシンモデルと比較検討した結果について示す.数 値シミュレーションは,米 MathWorks 社開発の数値解析用ソフトウェアである MATLAB を用いて行った.複数 RF タグのエミュレーション精度の評価を 3.1節,計算効率の評価を 3.2節に示す.数値シミュレーションでは実装した際の計算処理時間に関与するレジスタビッ ト長,命令長やプロトコル上の制限は考慮していないため,計算処理時間はハードウェア実 装時の評価ではなく,アルゴリズム間での相対的な評価である.

3.1 エミュレーション精度の評価

フレームサイズと RF タグ数を定めた状態でフレームにおける Success スロットの割合と, あらかじめ定めた数の RF タグの読み取りを完了するまでの総スロット数という2つの評価 軸で評価した.

3.1.1 Success スロットの割合を評価軸としたエミュレーション精度の評価

フレームサイズを 16 に固定し, RF タグ数を 2~40 の間の範囲で変化させ, 10000 フレーム試行した場合の Success スロットの割合をマルチステートマシンモデル,従属試行モデル, 独立試行モデルで計算した.結果を図 3.1 に示す.



第 3章 数値シミュレーションによる複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズム の性能評価

図 3.1: Success スロットの割合を評価軸としたエミュレーション精度の評価

従属試行モデルにおける Success スロットの割合とマルチステートマシンモデルにおける Success スロットの割合の差を比較すると,最も差が大きい部分(RF タグ数が25の場合)で は0.2%の差,最も差が小さい部分(RF タグ数が13,37の場合)では誤差ゼロ,差の平均 (RF タグ数が2~40の平均)を求めると,0.1%の差であることがわかった.マルチステート マシンモデルの10000 フレーム試行を2回行ってみた結果,1回目の試行と2回目の試行で は差の平均に0.1%のズレがあったことから,0.1%程度の変動は許容すると考える.したがっ て,従属試行モデルのSuccess スロットの割合とマルチステートマシンモデルのSuccess ス ロットの割合は正確に合致しているといえる.

独立試行モデルにおける Success スロットの割合とマルチステートマシンモデルにおける Success スロットの割合の差を比較すると,最も差が大きい部分(RF タグ数が8の場合)で は3.3%の差,最も差が小さい部分(RF タグ数が2の場合)では1.2%の差,差の平均(RF タグ数が2~40の平均)を求めると,2.0%の差であることがわかった.独立試行モデルにお ける Success スロットの割合はグラフ上で劣化方向にバイアスしているが,全体的な傾向は近 似できているといえる.

3.1.2 インベントリ所要スロット数を評価軸としたエミュレーション精度の評価

従属試行モデルおよび独立試行モデルにおいて,フレームサイズとRFタグ数を定めた状態で,あらかじめ定めた数のRFタグの読み取りを完了するまでの総スロット数を平均値, 累積確率分布の2つの評価軸でマルチステートマシンモデルと比較した.

第 3 章 数値シミュレーションによる複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズム の性能評価

インベントリ所要スロット数の平均値を評価軸としたエミュレーション精度の評価

RF タグ数を1~1000の間で変化させ,各RF タグ数の場合においてフレームサイズ Lを 2,4,8,16,32,64,128,256,512,1024と固定した10パターンの条件で,マルチステートマ シンモデル,従属試行モデル,独立試行モデルのインベントリ所要スロット数の計測を10000 回行い,平均値を求めた.ただし,全10000パターン(1000 × 10)の内,マルチステート マシンモデルのインベントリ所要スロット数の平均値が8000スロット以上のRF タグ数とフ レームサイズの組み合わせの条件は取り除き,4585パターン*において評価を行った.一般 的にリーダ/ライタでは,インベントリ終了判定を行っていなかったり,フレーム内でRF タグの応答がなければインベントリを終了と判定するなど,リーダ/ライタ独自の基準でイ ンベントリを終了と判定することが多い.あらかじめRF タグ数がわからないためである.こ の場合,インベントリ所要スロット数はフレームサイズの倍数になる.本評価においては, エミュレーションするRF タグ総数はあらかじめわかっているため,フレーム内において残 RF タグ数が0になったスロットでインベントリ終了と判定した.これにより,フレーム数 の倍数に丸め込まれず,詳細にインベントリ所要スロット数の違いを比較できる.

従属試行モデルにおけるインベントリ所要スロット数の平均値とマルチステートマシンモ デルにおけるインベントリ所要スロット数の平均値を比較すると、4585 パターンの誤差の 平均として 0.10%の差であることがわかった.また、一般的にインベントリでは、インベン トリ所要スロット数が最も少ないフレームサイズを選択する場合が多い.そこで、各 RF タ グ数の場合においてインベントリ所要スロット数が最も少ないフレームサイズを選択(例と して、RF タグ数 10 の場合 L = 8、RF タグ数 100 の場合 L = 64、RF タグ数 1000 の場合 L = 512)して、従属試行モデルとマルチステートマシンモデルの 1000 パターンの誤差の平 均を求めた.その結果、0.08%の誤差であることがわかった.マルチステートマシンモデル の 10000 フレーム試行を 2 回行ってみた結果、1 回目の試行と 2 回目の試行では全体の平均 (4585 パターン)に 0.10%のズレ、インベントリ所要スロット数が最も少ないフレームサイ ズを選択した場合の平均(1000 パターン)に 0.08%のズレがあった.したがって、従属試行 モデルのインベントリ所要スロット数の平均値とマルチステートマシンモデルのインベント リ所要スロット数の平均値は正確に合致しているといえる.

独立試行モデルにおけるインベントリ所要スロット数の平均値とマルチステートマシンモ デルにおけるインベントリ所要スロット数の平均値を比較すると,4585 パターンの誤差の平 均として 7.6%の誤差であることがわかった.また,各 RF タグ数の場合においてインベント リ所要スロット数が最も少ないフレームサイズを選択した場合,誤差の平均として 5.4%の誤 差であることがわかった.したがって,独立試行モデルでは,数%の誤差でマルチステート マシンモデルと近似しているといえる.

インベントリ所要スロット数の累積確率分布を評価軸としたエミュレーション精度の評価 マルチステートマシンモデル,従属試行モデル,独立試行モデルのインベントリ所要スロッ ト数の計測を10000回行い,累積確率分布を求めた.インベントリの終了判定は,上記と同 様に,フレーム内において残 RF タグ数が0になったスロットでインベントリ終了と判定し た.フレームサイズが16,RF タグ数が30の場合のインベントリ所要スロット数の累積確率 分布を図3.2に示す.

^{*} L = 2:16 $\mathcal{N} \mathcal{P} - \mathcal{V}$, L = 4:34 $\mathcal{N} \mathcal{P} - \mathcal{V}$, L = 8:67 $\mathcal{N} \mathcal{P} - \mathcal{V}$, L = 16:126 $\mathcal{N} \mathcal{P} - \mathcal{V}$, L = 32:230 $\mathcal{N} \mathcal{P} - \mathcal{V}$, L = 64:409 $\mathcal{N} \mathcal{P} - \mathcal{V}$, L = 128:703 $\mathcal{N} \mathcal{P} - \mathcal{V}$, L = 256:1000 $\mathcal{N} \mathcal{P} - \mathcal{V}$, L = 512:1000 $\mathcal{N} \mathcal{P} - \mathcal{V}$, L = 1024:1000 $\mathcal{N} \mathcal{P} - \mathcal{V}$



第 3章 数値シミュレーションによる複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズム の性能評価

図 3.2: インベントリ所要スロット数を評価軸としたエミュレーション精度の評価

従属試行モデルとマルチステートマシンモデルでは,累積確率分布からも,マルチステートマシンモデルの挙動と従属試行モデルの挙動は正確に合致しているといえる.独立試行モデルとマルチステートマシンモデルでは,エミュレーション精度は劣るものの,全体的な傾向はよく近似している.図3.1に示したようにSuccessスロットの占める割合が従属試行モデルに比して低くなるため,独立試行モデルでは,インベントリに必要な総スロット数は, 従属試行モデルに比べて多くなる.

3.2 計算効率の評価

RF タグ数を 2~40 の間の範囲で変化させ,各 RF タグ数の場合に 10000 回インベントリ を行った際のインベントリ 1 回に要した平均計算処理時間をマルチステートマシンモデル, 従属試行モデル,独立試行モデルで比較した.結果を図 3.3 に示す.

図 3.3 で示すように,独立試行モデルと従属試行モデルはともに,マルチステートマシン モデルと比較して計算の効率化ができる.従属試行モデルでは,マルチステートマシンモデ ルと比較して,平均(RF タグ数2~40の平均)で29.1%の計算処理時間の削減ができる.ま た,独立試行モデルでは,マルチステートマシンモデルと比較して,平均で85.5%の計算処 理時間の削減ができる.したがって,独立試行モデルでは,従属試行モデルと比べて大幅に 計算の効率化ができる.



第 3章 数値シミュレーションによる複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズム の性能評価

図 3.3: アルゴリズムの計算処理時間の比較

3.3 本章のまとめ

数値シミュレーション結果より,従属試行モデルでは,マルチステートマシンモデルと比較して計算を効率化しつつ,正確に複数RFタグの挙動をエミュレーションできることがわかった.一方で,独立試行モデルでは,多少,エミュレーション精度は劣化するが全体的な傾向は一致しており,大幅に計算の効率化ができることがわかった.したがって,MACプロトコルの比較など,相対的な評価の場合には,独立試行モデルも有効である.次章では,ハードウェア機器への従属試行モデルおよび独立試行モデルの実装について述べる.

第4章 複数RFタグMACエミュレーション アルゴリズムのBAPへの実装

本章では,2つの複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズムを 8bit MPU を有するプ ログラマブル電池つきパッシブタグ(BAP)[14] へ実装した結果について述べる.このハー ドウェアを使った理由は,必要な変復調回路をすでに備えていた点と,複数の市販リーダ/ ライタとの接続性が検証済みのステートモデルを有しているためである.

4.1 BAPの概要

BAP は,8bit MPU を有し、プログラマブルである.また、通常の RF タグと同様に無線で 読み取りを行えることに加えて,SMA コネクタが設置されているため,リーダ/ライタと の間を有線で接続して読み取りを行うことが可能である.BAP の概観を図 4.1 に示す.



図 4.1: BAP の概観

4.2 エミュレーションできる RF タグの最大数を決める要因

C1G2 プロトコルの仕様では, RF タグは, リーダ / ライタからコマンドを受信した際に, 各コマンドに対する応答は T_1 以内(代表的には T_1 はリーダ / ライタの伝送速度で決まる) に行わなければならないと定められている(図 4.2).



図 4.2: C1G2 プロトコルにおけるリンクタイミング [1]

したがって,エミュレーションできる RF タグの最大数は,各コマンドに対する応答処理において,律速となる応答処理の計算処理時間によって決まる.

4.3 実装上の工夫案1:計算効率化モデル

従属試行モデルおよび独立試行モデルを BAP へ実装する際に,できる限り多くの数の RF タグのエミュレーションができるよう,計算効率化モデルを提案する [20].計算効率化モデ ルの実現方法を 4.3.1 項に,計算効率化モデルでエミュレーションできる RF タグの最大数 に関して評価した結果を 4.3.2 項に示す.また,複数台の BAP を使用してエミュレーション を行うことの可否について 4.3.3 項に示す.

4.3.1 計算効率化モデルの実現方法

最初に,独立試行モデルの計算処理の工夫に関して,計算式とプログラム記述を用いて説 明する. 2.5節の式 (2.2) を変形すると、以下の式 (4.1) となる.式 (4.1) によれば、E、Sで、 $(\frac{L-1}{2^Q})^{n-1}(\frac{1}{2^Q})^*$ の計算処理は、共通で利用できることがわかる.

$$E = \left(\frac{L-1}{2^Q}\right)^{n-1} \left(\frac{1}{2^Q}\right) (L-1)$$

$$S = \left(\frac{L-1}{2^Q}\right)^{n-1} \left(\frac{1}{2^Q}\right) n$$
(4.1)

次に,8bit MPUでは,浮動小数点演算の負荷が大きいため,E,Sに 2^{16} を乗数としてかけ整数演算で近似する.乗数に 2^{16} を選択した理由は,C1G2 プロトコル準拠のRF タグがスロットをランダムに選択する目的(付録 A)などで持つ,16bit 乱数発生器を比較対象の乱数Rの発生器としてそのまま利用できるからである.式(4.2)は式(4.1)に 2^{16} を乗数としてかけることにより,整数で表現された Empty となる境界値 E_I ,Success となる境界値 S_I の式である(図 4.3).



図 4.3: 整数演算での近似

$$E_{I} = 2^{16} \left(\frac{L-1}{2Q}\right)^{n-1} \left(\frac{1}{2Q}\right) (L-1)$$

$$S_{I} = 2^{16} \left(\frac{L-1}{2Q}\right)^{n-1} \left(\frac{1}{2Q}\right) n \qquad (4.2)$$

式 (4.2)の計算の途中経過も全て整数演算で行うためには,式(4.2)を式(4.3)のように変形すればよい.

$$E_I = 2^{16-Qn}(L-1)^{n-1}(L-1)$$

$$S_I = 2^{16-Qn}(L-1)^{n-1}n$$
(4.3)

しかしながら,式(4.3)では, $(L-1)^{n-1}$ の計算処理が問題となり,少ない数のnでも16bit の表現範囲を超えオーバフローが発生してしまう. E_I , S_I を16ビット符号なし整数で表現 すると,フレームサイズLが8(Qが3)の時には,フレーム内でまだ応答していないRFタ グの数を表すnが6,Lが16(Qが4)の時にはnが5で,オーバフローが発生してしまう. したがって,式(4.3)の計算処理では,エミュレーションできるRFタグの最大数が限られて しまうことになる.

^{*}フレームサイズ $L = 2^Q$

そこで,エミュレーションできる RF タグの数を増やすために,式 (4.2) を式 (4.4) のように変形する.つまり, $(L-1)^{n-1}$ を1度にかけるのでなく,分散させて乗算を行い,16bitの表現範囲を超えないようにフレームサイズに応じて拡大を制限するのである.

$$E_{I} = 2^{16-Q} \left(\frac{L-1}{2^{Q}}\right)^{n-1} (L-1)$$

$$S_{I} = 2^{16-Q} \left(\frac{L-1}{2^{Q}}\right)^{n-1} n$$
(4.4)

これによって, E_I , S_I を 16 ビット符号なし整数で表現してもオーバフローがおきなくなる.計算手順は,最初に初期値として,1を 16 – Qビット左シフトした値 x を用意する.次に,xに対して,L-1を乗数としてかける Qビット右シフトする」処理をn-1回繰り返す.最後にxに対してL-1を乗数としてかけることで E_I ,xに対してnを乗数としてかけることで S_I を求める.

計算方法を工夫した独立試行モデルのプログラム記述の E_I , S_I の計算処理部分の抜粋を 図 4.4 に示す.

```
uint16_t x = (1 \ll 16-q);
uint8_t ii;
if (n == 0) { //if number of not-yet-detected RF tags = 0
  ei = 65535; //0xFFFF
  si = 0;
else if
(n == 1) { //if number of not-yet-detected RF tags = 1
  ei = x * (l-1);
  si = 65535 - ei;
ł
else { //if number of not-vet-detected RF tags \geq 2
  for(ii=1; ii<=n-1; ii++) {
    x = x * (l-1);
    \mathbf{x} = \mathbf{x} \gg (\mathbf{q} - 1);
    if(x\&1) {
       \mathbf{x} = (\mathbf{x} \gg 1) + 1;
     }
    else {
       x = x \gg 1;
     }
  }
  ei = x * (l-1);
  si = x * n;
```

図 4.4: 確率の計算方法の最適化

図 4.4 の方法で計算した E_I , S_I と, 16bit 乱数(0~65535)を比較することで,各スロットにおいて Empty, Success, Collision を決定する.

従属試行モデルの場合には、式 (4.5) に示すように、フレームサイズ (L, 2^Q) をL - i に置き換えることで整数演算で近似できる.

$$E_I = 2^{16-Q} \left(\frac{L-i-1}{L-i}\right)^{n-1} 2^Q \left(\frac{L-i-1}{L-i}\right)$$

$$S_I = 2^{16-Q} \left(\frac{L-i-1}{L-i}\right)^{n-1} 2^Q \left(\frac{n}{L-i}\right)$$
(4.5)

以上に示す計算方法の工夫では,整数演算で近似した際の丸め誤差の影響を抑えることができる.丸め誤差の影響を確認するために,MATLABを用いた数値シミュレーションでの確率の計算値 E を 2^{16} 倍して四捨五入した値と,BAP での 16bit 整数表現の計算値 E_I を比較した.比較は,Q = 4, 6, 8のそれぞれの場合において,RF タグ数を $2 \sim 40$ まで変化させて行った.結果を図 4.5 に示す.



図 4.5: 丸め誤差の影響

最も丸め誤差の影響が大きい Q が 8, RF タグ数が 40 の条件において,数値シミュレー ションでの E の計算値を 2¹⁶ 倍した値は 56040, BAP での E_I の計算値は 55355 であった. この誤差によって,本来,Empty と判定すべきを Success と判定を誤る可能性は,55356~ 56040 の乱数が出現する 1.1%であり,丸め誤差の影響は無視できるレベルである.

4.3.2 計算効率化モデルにおけるエミュレーションできる RF タグの最大数の評価

実測の結果, T_1 以内に計算処理が終わる RF タグの最大数に関して,リーダ / ライタの伝送速度が 40kbps ($T_1 = 250\mu$ s),フレームサイズが 16の条件下において,従属試行モデルでは 7個の RF タグのエミュレーションが可能であり,独立試行モデルでは 38 個の RF タグのエミュレーションが可能であり.

また,表4.1 に示すように,従属試行モデルではフレームサイズの長さがエミュレーションできる RF タグの最大数に影響を与えず,一方で独立試行モデルでは,フレームサイズが 長くなるほどエミュレーションできる RF タグの最大数が減ることがわかった.

Frame size	Independent Trial Model	Dependent Trial Model
8(Q=3)	43	7
16(Q=4)	38	7
32(Q=5)	34	7
64(Q=6)	31	7
128(Q=7)	28	7
256(Q=8)	26	7

表 4.1: 各フレームサイズにおけるエミュレーションできる RF タグの最大数

この理由は,以下に再記する、従属試行モデルの E_I の計算式と独立試行モデルの E_I の計 算式を比較することで説明できる.

$$E_{I} = 2^{16-Q} \left(\frac{L-i-1}{L-i}\right)^{n-1} 2^{Q} \left(\frac{L-i-1}{L-i}\right)$$
$$E_{I} = 2^{16-Q} \left(\frac{L-1}{2^{Q}}\right)^{n-1} (L-1)$$

従属試行モデルでは,スロットごとに確率を再計算しているため,割り算をシフト演算で 置き換えることができない.一方,独立試行モデルでは,割り算をシフト演算に置き換えら れる.元々の計算負荷が大きい割り算(例えばフレームサイズが16の時にシフト演算の約6 倍の時間を要する)では,除数を大きくしても計算処理時間に変化はない.したがって,従 属試行モデルではフレームサイズを長くしても *E*_Iの計算処理時間に影響はない.一方で,割 り算をシフト演算に置き換えた場合,シフト演算の計算処理時間はシフト量に依存して長く なる.このため,フレームサイズを長くするほど *E*_Iの計算処理時間が長くなる.

4.3.3 複数台の BAP を使用してのエミュレーションの可否の確認

本項では, Success になる確率 S が, 複数台の BAP を使用しても変化しないことを示すことにより, 複数台の BAP を使用してより多数の RF タグのエミュレーションを行えることを示す.以下に,独立試行モデルにおける S の計算式を再記する.

$$S = {}_{n}C_{1}(1-\frac{1}{L})^{n-1}(\frac{1}{L})$$
(4.6)

ここで,2台の BAP で,それぞれ t_1 個, t_2 個の RF タグをエミュレーションする場合を 考える(全体のエミュレーション RF タグ数 $n = t_1 + t_2$).この場合,Success になるケー スは,1) BAP#1 が Success かつ BAP #2 が Empty, 2) BAP#2 が Success かつ BAP #1 が Empty, の2通りであることから,全体で Success になる確率は式(4.7)となる.

$$S = t_1 C_1 (1 - \frac{1}{L})^{t_1 - 1} (\frac{1}{L}) (1 - \frac{1}{L})^{t_2} + t_2 C_1 (1 - \frac{1}{L})^{t_2 - 1} (\frac{1}{L}) (1 - \frac{1}{L})^{t_1}$$
(4.7)

また,式(4.7)は式(4.8),式(4.9)と変形できる.

$$S = {}_{t_1}C_1(1-\frac{1}{L})^{t_1+t_2-1}(\frac{1}{L}) + {}_{t_2}C_1(1-\frac{1}{L})^{t_1+t_2-1}(\frac{1}{L})$$
(4.8)

$$= t_{1+t_2} C_1 \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{t_1 + t_2 - 1} \left(\frac{1}{L}\right)$$
(4.9)

式 (4.9) において $n = t_1 + t_2$ より,式 (4.9) = 式 (4.6) となる.

次に, x 台の BAP で RF タグをエミュレーションする場合を考える(全体のエミュレー ション RF タグ数 $n = \sum_{i=1}^{x} t_i$). この場合, Success になるケースは, いずれかの BAP1 台が Success で残りの BAP は全て Empty になる, x 通りであることから, 全体で Success にな る確率は式(4.10)となる.

$$S = {}_{t_1}C_1(1-\frac{1}{L})^{t_1-1}(\frac{1}{L})(1-\frac{1}{L})^{\sum_{i=1}^{x}t_i-t_1} + {}_{t_2}C_1(1-\frac{1}{L})^{t_2-1}(\frac{1}{L})(1-\frac{1}{L})^{\sum_{i=1}^{x}t_i-t_2} + \dots + {}_{t_x}C_1(1-\frac{1}{L})^{t_x-1}(\frac{1}{L})(1-\frac{1}{L})^{\sum_{i=1}^{x}t_i-t_x}$$

$$(4.10)$$

また,式(4.10)は式(4.11),式(4.12)と変形できる.

$$S = {}_{t_1}C_1(1-\frac{1}{L})^{\sum\limits_{i=1}^{x}t_i-1}(\frac{1}{L}) + {}_{t_2}C_1(1-\frac{1}{L})^{\sum\limits_{i=1}^{x}t_i-1}(\frac{1}{L}) + \dots + {}_{t_x}C_1(1-\frac{1}{L})^{\sum\limits_{i=1}^{x}t_i-1}(\frac{1}{L})(4.11)$$
$$= {}_{\sum\limits_{i=1}^{x}t_i}C_1(1-\frac{1}{L})^{\sum\limits_{i=1}^{x}t_i-1}(\frac{1}{L})$$
(4.12)

式 (4.12) において $n = \sum_{i=1}^{x} t_i$ より,式 (4.12) = 式 (4.6) となる.

以上により, 複数台の BAP を使用しても Success になる確率 S が変化しないことが数式 により確認できた.したがって,本提案アルゴリズムでは,複数台の BAP を使用してより 多数の RF タグのエミュレーションを行えることが示された.例えば,BAP10 台を使用する 場合,独立試行モデルで,フレームサイズ 16 の条件下で 380 台,フレームサイズ 256 の条 件下で 260 台の RF タグのエミュレーションを行うことが可能となる.

4.4 実装上の工夫案 2 : SRAM モデル

4.3 節に示すように実装の際,計算方法を工夫することで,独立試行モデルである程度の 個数の RF タグのエミュレーションを行うことが可能になる.これにより,BAP を複数台用 いることで,現在主流となっているパレットレベルやケースレベルの RF タグ貼付を行う場 合のインベントリ速度の評価は可能となる.しかしながら,今後主流となることが予測され るアイテムレベルの RF タグ貼付を行う場合のインベントリ速度の評価を行うには多数台の BAP が必要となり,評価の手間もかかる.アイテムレベルタギングを実現する場合,1.1.1 項で述べたように,最大で1000 個程度の RF タグのインベントリを行うことが必要である. そこで,実装上の別の工夫案として,より多くの個数の RF タグのエミュレーションを実現 する SRAM モデルを提案する.SRAM モデルの実現方法を4.4.1 項に,SRAM モデルでエ ミュレーションできる RF タグの最大数に関して評価した結果を4.4.2 項に示す.

4.4.1 SRAM モデルの実現方法

BAPには,実装された電界強度センサの測定値を格納する目的などで4MbitのSRAMが 実装されている.SRAMモデルでは,インベントリを行う前に全ての確率の計算パターンを 4Mbit SRAMに格納し,インベントリ中は確率の計算を行わず,残RFタグ数nおよび,フ レームサイズ(Q値)に応じて,4Mbit SRAMから確率の計算値を取得する.これにより, nに比例して長くなる確率の計算処理時間を4Mbit SRAMからのリードの計算処理時間に 置き換えることが可能となる.4Mbit SRAMからのリードの計算処理時間は確率の計算処理 時間と比較して短い(nが2の場合の計算処理時間に相当する).したがって,エミュレー ションが可能な RF タグの最大数を決定する要素として,計算処理時間のボトルネックを大 幅に緩和し,ボトルネックを SRAMのメモリ容量に置き換えることが可能となる.

SRAM モデルは,確率の計算パターンが少なくて済む独立試行モデルにとって非常に有効 な実装方法である.以下に示す,2.5節で述べた独立試行モデルの特徴が,確率の計算処理時 間を削減するだけでなく,確率の計算パターンを減らす効果も齎すためである.

- 1. 各フレームにおいて最初のスロットでのみ確率計算を行い,最初のスロット以外のス ロットでは,最初のスロットで計算した確率の値を用いる
- Collision 判定の際に Collision している RF タグ数を計算せず Collision 数を決定論的 に決定する



SRAM モデルに基づいた独立試行モデルの実装方法を図 4.6 に示す.

図 4.6: SRAM モデルに基づいた独立試行モデルの実装方法

4.4.2 SRAM モデルにおけるエミュレーションできる RF タグの最大数の評価

SRAM モデルにおけるエミュレーションできる RF タグの最大数は, SRAM からのリード の計算処理を含めた計算処理時間が T_1 以内に収まっている場合, 確率の計算パターンの数に よって決まる. 1つの確率の値を 16bit で表しているため, 4Mbit では 4 × 1024 × 1024/16 = 262144 個の確率の値を格納することができる. また, C1G2 プロトコルの仕様でフレームサイズを決定する Q 値は 16 パターン ($2^0 = 1, 2^1 = 2, 2^2 = 4..., 2^{15} = 32768$)が用意されている.

これらをふまえ,SRAM モデルを適用した場合,従属試行モデルおよび独立試行モデル でエミュレーションできる RF タグの最大数に関して考察する.従属試行モデルでは,確率 の計算値に $(L-i)^{\dagger}$ を含むため,それぞれの RF タグ数に対して,32768 パターン $(1^{\ddagger}, 2, 3, 4, 5..., 32768)$ の確率の計算値を格納しておく必要がある.一般的にリーダ/ライタは 14 や 15 といった大きな値の Q 値を扱うことは稀であることから,エミュレータで対応する Q 値 を限定して,格納するパターンを減らすことも考えられる.しかしながら,従属試行モデル は,Collision している RF タグの数を考慮した C_{Ia} $(a = 2 \sim n)$ の計算も行う必要がある. Collision している RF タグのの計算は,エミュレータが Collision と判定した後,次のコマン ドが来るまでの間に計算すれば良いことから,計算に使える時間は T_1 よりも長いものの,nが大きくなると計算処理が間に合わなくなる.したがって,従属試行モデルでは, $E_I \ge S_I$ に加えて (n-2) 個の C_{Ia} ($e, C_2 \times 2^{16}$ to $C_n \times 2^{16}$) も格納しておく必要がある.このように, 従属試行モデルでは,大量のメモリ容量を必要とし,BAP に実装されている 4Mbit SRAM のメモリ容量では,SRAM モデルの効果は薄い.

一方で,独立試行モデルでは,確率の計算値に(L-i)が含まれていなく,Lのみが含まれることから,それぞれのRFタグ数に対して,16パターン($2^0 = 1, 2^1 = 2, 2^2 = 4..., 2^{15} = 32768$)の確率の計算値を格納しておくだけで良い. Collision している RF タグの数を考慮した C_{Ia} の計算も行わないことから, $E_I \ge S_I$ のみを格納しておくだけで良い. したがって,独立試行モデルでエミュレーションできる RF タグの最大数は 8191 個(262144/16/2 - 1 = 8191)となる. ここで1を減算している理由は,必ず Empty とする残 RF タグ数が0 個になった場合の確率の計算も必要だからである.

4.5 本章のまとめ

本章では,エミュレーションできる RF タグの最大数を増やすことを目的とした,計算効率化モデル,SRAM モデルという2つの実装方法を提案した.計算効率化モデルを実装方法に用いた場合,従属試行モデルで7個,独立試行モデルで38個の RF タグを1台の BAP でエミュレーションできる.さらに,SRAM モデルを実装方法に用いた場合,独立試行モデルで8191個の RF タグを1台の BAP でエミュレーションできる.次章では,提案した複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズムの有用性を性能評価した結果について述べる.

[†]L はフレームサイズ, i はスロット番号(0, 1, 2..., L - 1)

 $^{^{\}ddagger}L=1,i=0$ or L=2,i=1 or L=4,i=3... or L=32768,i=32767

第5章 実装による複数RFタグMACエミュ レーションアルゴリズムの性能評価

本章では, BAP に複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズムを実装して行った性能 評価について述べる.

5.1 エミュレーションできる RF タグの最大数の評価

エミュレーションできる RF タグの最大数の評価については,4.3.2 項および 4.4.2 項でも 触れたが,本節では,リーダ/ライタの伝送速度を変化させた場合の評価について示す.こ れまで,リーダ/ライタの伝送速度を 40kbps ($T_1 = 250\mu$ s)に固定して評価を行っていた のに対し,リーダ/ライタの伝送速度を 80kbps ($T_1 = 125\mu$ s)に変化させた場合の T_1 以内 にエミュレーションできる RF タグ数の評価を表 5.1 に示す.

表 5.1: リーダ / ライタの伝送速度を変化させた場合のエミュレーションできる RF タグの最 大数の評価

Implementation	40kbps	$80 \mathrm{kbps}$
Dependent Trial Model	7	2
Independent Trial Model	38	11
Independent Trial Model with SRAM	8191	8191

表 5.1 に示すように,計算効率化モデルに基づいた従属試行モデルおよび独立試行モデル では,計算処理時間がボトルネックとなるため,リーダ/ライタの伝送速度を上げるとエミュ レーションできる RF タグの最大数は減少する.一方で,SRAM モデルに基づいた独立試行 モデルでは,計算処理時間のボトルネックが緩和され,リーダ/ライタの伝送速度を上げて もエミュレーションできる RF タグの数は変わらない.このように,SRAM モデルでは,伝 送速度が速いリーダ/ライタの評価を行う際により有意性が顕著になる.

5.2 実装によるエミュレーション精度の評価

本節では,数値シミュレーションのエミュレーション精度と実装のエミュレーション精度 を比較することにより,実装におけるエミュレーション精度の妥当性を検証した結果を示す. エミュレーション精度の評価方法を5.2.1項,実装方法に計算効率化モデルを採用した場合の エミュレーション精度の評価を5.2.2項,実装方法にSRAMモデルを採用した場合のエミュ レーション精度の評価を5.2.3項に示す.
5.2.1 エミュレーション精度の評価方法

信号発生器とBAPを有線で接続することで評価を行った.信号発生器では,MATLABで 作成したリーダ/ライタのプログラムに基づいた信号を発生させている.具体的には,Select Query QueryRep QueryRep … QueryRep Select …というリーダ/ライ タのコマンドを周波数953MHz,信号出力-10dBm,伝送速度40kbpsで出力した.通信は, 信号発生器 BAPの一方向通信のため,エミュレーション精度の評価方法として,フレー ムにおけるSuccessスロットの割合をマルチステートマシンモデルの数値シミュレーション 結果と比較した.評価方法の概略図を図 5.1 に示す.



図 5.1: エミュレーション精度の評価方法の概略図

5.2.2 計算効率化モデルにおけるエミュレーション精度の評価

図 5.2 は,従属試行モデルの実装,および独立試行モデルの実装において,フレームサイ ズを 16 に固定し,RF タグ数を 2~40 の間の範囲で変化させ,10000 フレーム試行した場合 の Success スロットの割合におけるマルチステートマシンモデルの数値シミュレーション結 果との合致度を表す.なお,4.3.2 項に示したように計算効率化モデルを実装方法に選択した 場合,従属試行モデルでエミュレーションできる RF タグの最大数は 7 個,独立試行モデル でエミュレーションできる RF タグの最大数は 7 個,独立試行モデル でエミュレーションできる RF タグの最大数は 38 個であるため,従属試行モデルでは RF タ グ数が 2~7 の間の範囲での比較,独立試行モデルでは RF タグ数が 2~38 の間の範囲での 比較である.



図 5.2: 実装によるエミュレーション精度の評価(計算効率化モデル)

Success スロットの割合におけるマルチステートマシンモデルの数値シミュレーション結果 との合致度に関して、従属試行モデルの誤差の平均が0.6%、独立試行モデルの誤差の平均が 2.7%であることがわかった.従属試行モデル、独立試行モデルのSuccess スロットの割合を数 値シミュレーションで求めた結果(3.1.1項)では、従属試行モデルの誤差の平均が0.1%、独 立試行モデルの誤差の平均が2.0%であったが、数値シミュレーションとBAPでは使用して いる乱数発生器が異なる*ため、この程度の誤差は許容範囲であると考える.したがって、提 案アルゴリズムをBAPに実装した際にも、従属試行モデルでは、正確に複数RFタグの挙動 をエミュレーションでき、独立試行モデルでは、エミュレーション精度は劣化するがSuccess スロットの割合の全体的な傾向は数%の劣化方向の誤差で近似できる.

5.2.3 SRAM モデルにおけるエミュレーション精度の評価

図 5.3 は, SRAM モデルを実装方法に選択した独立試行モデルにおいて,1000 フレーム 試行した場合の Success スロットの割合におけるマルチステートマシンモデルの数値シミュ レーション結果との合致度を表す.比較は,フレームサイズ128 と 256 の 2 パターンで,RF タグ数は 2~1000 の間(RF タグ数 2 個の場合を除いて 50 個から 1000 個まで 50 個間隔で計 測)で変化させた.

^{*}数値シミュレーションでは MATLAB の randint 関数を使用し, BAP では C1G2 プロトコル準拠の RF タ グがスロットをランダムに選択する目的などで持つ, LFSR (Linear Feedback Shift Register) に基づく 16bit 乱数発生器を使用している.



図 5.3: 実装によるエミュレーション精度の評価 (SRAM モデル)

SRAM モデルでは,確率の計算処理時間の削減を考えなくても良いため,計算の途中経過 を浮動小数点演算で行っている.これにより,MATLABを用いた数値シミュレーションで の確率の計算値を 2¹⁶ 倍して四捨五入した値と,BAP での 16bit 整数表現の計算値の近似度 は,計算効率化モデルよりも更に高くなる.

5.3 C1G2 プロトコル対応リーダ / ライタでの動作確認

計算効率化モデルにおける従属試行モデル,独立試行モデル,SRAM モデルにおける独立 試行モデルの3種類の実装に関して,C1G2プロトコル対応の市販リーダ/ライタで動作確 認を行った.動作確認では,市販のC1G2プロトコル対応リーダ/ライタで BAP を読み取 り,インベントリ速度を計測できることを確認した.本評価で使用した市販リーダ/ライタ は,NEC Tokin 社製のICT-5055(図5.4)である.



図 5.4: NEC Tokin 社リーダ / ライタ (ICT-5055)の概観

本評価ではリーダ / ライタの伝送速度は 40kbps に設定している. なお, NEC Tokin 社製 の ICT-5055 では, インベントリ高速化のために, 次フレームサイズを残 RF タグ数に応じて 動的に変化させる動的フレーム ALOHA 方式を採用している. エミュレーション対象の RF タグ数は, 7, 38, 50, 100, 200, 500, 1000 であり, それぞれ 1000 回のインベントリを行い, インベントリ所要スロット数の平均値を算出した. 結果を図 5.5 に示す.



第5章 実装による複数 RF タグ MACエミュレーションアルゴリズムの性能評価

図 5.5: C1G2 プロトコル対応の市販リーダ / ライタでの動作確認

7個の RF タグのエミュレーションにおいて,従属試行モデルのインベントリ所要スロット数の平均値は 66.53 スロット (SRAM モデルにおける)独立試行モデルのインベントリ所要スロット数の平均値は 69.66 スロットであり,数値シミュレーションと同等の精度(本評価では 4.7%の誤差)でエミュレーションができていることを確認できた.

また,動的フレーム ALOHA 方式では,RF タグ数の増加に応じてリニアにインベントリ 所要スロット数が増加する傾向がある[12]が,本評価でもRF タグ数の増加に応じてリニア にインベントリ所要スロット数が増加している.これにより,SRAM モデルにおける独立試 行モデルでは,市販リーダ/ライタで1000個のRF タグのエミュレーションも問題なく行え ることを確認できた.

5.4 提案アルゴリズムによる市販リーダ / ライタの MAC プロトコ ル性能評価

独立試行モデルでも複数 RF タグの MAC プロトコルの挙動を数%の劣化方向の誤差で近 似できる.したがって, MAC プロトコルの性能差を正確に定量化したい場合は従属試行モ デルを用いる必要があるが, MAC プロトコルの性能を単純に比較する上では, 独立試行モ デルでも十分な性能であるといえる.そこで,複数の市販リーダ/ライタの MAC プロトコル の比較評価を独立試行モデルを用いて行った [21]. 異なるリーダ / ライタの MAC プロトコ ルの比較評価のためには,各RF タグが受信する電力レベル,および各RF タグからの応答 の電力レベルを均一化することが必要である.この課題に対して,本研究では,評価対象の リーダ / ライタと提案アルゴリズムを実装した BAP をアッテネータを介して有線で接続す る(図 5.6).



図 5.6: MAC プロトコルの比較実験の構成

また,リーダ/ライタがアプリケーションに通知するインベントリ所要時間は,ベンダに より定義がまちまちであったり,そもそもインベントリ所要時間を通知しないリーダ/ライ タも存在するため,同じ基準でインベントリ終了条件を定義する必要がある.この課題に対 して,本研究では,BAP内でインベントリ所要時間を測定し,フレーム内でRFタグの応答 がなければイベントリ終了と判定する.

図 5.7 に 2 台のリーダ / ライタのインベントリ所要時間の比較結果を示す.本評価に使用したリーダ / ライタは,共にリーダ / ライタの伝送速度は 40kbps であり,インベントリ高速化のために,フレームサイズを RF タグの数に応じて動的に変化させる動的フレーム ALOHA方式を採用している.エミュレーション対象の RF タグ数は 2~37 (解像度 5)とし,同一条件下で 1000 回の試行を行い平均値をイベントリ所要時間としている.



第5章 実装による複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズムの性能評価

図 5.7: リーダ / ライタのインベントリ所要時間の比較

図 5.7 より, リーダ / ライタ A よりもリーダ / ライタ B のインベントリ所要時間が短いことがわかる.これは,以下の4つが原因であると考える.

1. 次フレームサイズの調整アルゴリズムの性能

動的フレーム ALOHA 方式では, リーダ/ライタにとって観測可能な数を用いて, 解析的に次フレームの残 RF タグ数を推定し,次フレームサイズを調整することが主要な研究課題である [10][11][12].リーダ/ライタA とリーダ/ライタB では,次フレームサイズの調整アルゴリズムの性能に差があることが想定される.この考察の検証結果については後述する.

2. リーダコマンドの構成

オシロスコープを用いてリーダコマンドの構成を解析した結果,リーダ/ライタAは Select,Query,QueryRepの組み合わせでインベントリを実現していることがわかっ た.一方で,リーダ/ライタBはQuery,QueryRepの組み合わせでインベントリを 実現していることがわかった.このように,リーダ/ライタBではトリガをかけない 場合,Selectを削減する工夫していることがわかった.この要因により,リーダ/ライ タAでは,Selectの処理時間分,インベントリ所要時間が長くなる.

3. スロット間隔

4.2 節に示した図 4.2 において, T_1 (リーダ/ライタからのコマンドに対して RF タグが応答するまでの時間)は上述したように基準値が仕様で決まっているが, T_2 (RF タグが応答した際に, RF タグ応答の終了ビットからリーダ/ライタが次のコマンドを発するまでの時間)では最小値と最大値, T_3 (RF タグが応答しない際に, T_1 後リーダ/ライタが次のコマンドを発するまでの時間)では最小値のみしか仕様で規定されていない.したがって, リーダ/ライタの伝送速度が同じ条件でも T_2 や T_3 はリーダ/ライタによって異なる.リーダ/ライタ A では, リーダ/ライタ B と比較して, $T_2 \ge T_3$ の間隔が長いことがわかった.

4. フレーム間隔

リーダ / ライタ A では,フレームの終了から次フレームの開始までの間隔としてリー ダ / ライタ B の 6 倍もの間隔があることがわかった.この要因により,リーダ / ライ タ A では,フレームの繰り返し回数に依存して,インベントリ所要時間が長くなる.

ここで, BAP 内でインベントリ所要スロット数の測定を行うことで,他要因の影響を排除し,上記 1.の次フレームサイズの調整アルゴリズムの性能のみを評価できる.図 5.8 に 2 台のリーダ / ライタのインベントリ所要スロット数の比較結果を示す.



図 5.8: リーダ / ライタのインベントリ所要スロット数の比較

図 5.8 より, グラフで示す範囲では, リーダ / ライタ A よりもリーダ / ライタ B のインベン トリ所要スロット数が少ないことがわかる.しかしながら, リーダ / ライタ B の傾きは, リー ダ / ライタ A の傾きよりも急であることから, グラフで示す範囲よりも RF タグ数を増やし た場合,インベントリ所要スロット数が逆転することが想定される.したがって,エミュレー ションしたい RF タグ数が少ない場合は,初期フレームサイズに依存して初期フレームサイズ が短いリーダ/ライタ B のインベントリ所要スロット数が少なくなっているが,次フレームサ イズの調整アルゴリズムの性能はリーダ/ライタ B よりもリーダ/ライタ A が優れていると いえる.

このように,提案アルゴリズムを実装した BAP を用いることで,リーダ/ライタ全体の 性能から PHY 層が影響している部分と MAC 層が影響している部分を切り分けて,MAC 層 の性能のみを簡単に比較評価することが可能になる(図 5.9).



図 5.9: MAC プロトコルの性能のみを切り出した評価の実現

5.5 本章のまとめ

本章では, BAP への実装によりエミュレーションできる RF タグの最大数,エミュレー ション精度を評価するとともに, C1G2 プロトコル対応の市販リーダ/ライタで動作するこ とを確認した.さらに,複数の市販リーダ/ライタの MAC プロトコルを同じ基準で定量比 較評価した結果についても示した.本章までの成果により,1つ目の目的であるリーダ/ラ イタの高速 MAC プロトコルの評価方法を提供できる.次章では,2つ目の目的である電波 特性も含めた読み取り速度の評価・予測方法を提供するための手法について提案する.

第6章 電波特性を含めた複数 RF タグエミュレーション手法の提案

本章では,複数 RF タグエミュレータを RFID システムの設計・構築時にも用いることができるように、物理層の影響も含めた複数 RF タグエミュレーション手法を提案する.

6.1 複数 RF タグを並べた場合とエミュレータの差の検証

本節では,リーダ/ライタを用いて,複数 RF タグを並べて読み取った場合と,独立試行 モデルを実装した BAP を読み取った場合のインベントリ速度を比較した結果を示す.

6.1.1 検証実験1:電波暗箱環境における比較実験

検証実験1では,比較対象として 30 個の RF タグを貼り付けた RF タグボードを使用した.検証実験1の実験装置の構成を図 6.1 に示す.







図 6.1: 検証実験1の実験装置概略図

本実験では,最初に電波暗箱を使用してリーダ / ライタで 30 個の RF タグを貼り付けた RF タグボードを読み取った.200 回のインベントリを行った際に,各インベントリで読まれ た RF タグの個数を図 6.2 に示す.





図 6.2: 30 個の RF タグの読み取りにおけるインベントリ毎の読み取り RF タグ数(電波暗 箱環境)

図 6.2 から,インベントリごとの RF タグ数は一定ではなく,30 個の RF タグを読み終わら ずにインベントリが終了する場合も多々起こることがわかる.なお,本実験で使用したリー ダ / ライタ(NEC Tokin 社製の ICT-5055)では EPC 受信毎の RSSI(RF タグからの受信 信号強度)を測定することが可能である(図 6.3).



図 6.3: リーダ / ライタアプリケーション (EPC 受信毎の RSSIの測定)

本実験では,読み取り環境を近似するために,30個の RF タグを貼り付けた RF タグボードを読み取った際の RSSI を取得し, RSSI の期待値を算出した後,期待値が一致するように BAP の位置を調整した.実験図を図 6.4 に示す.



Using multiple RF tags







複数 RF タグおよび BAP の読み取りにおいて, インベントリ毎の読み取り RF タグ数をプロットした散布図を図 6.5 に, インベントリ所要スロット数をプロットした散布図を図 6.6 に

第6章 電波特性を含めた複数 RF タグエミュレーション手法の提案

示す.



図 6.5: 複数 RF タグを並べた場合とエミュレータ使用におけるインベントリ毎の読み取り RF タグ数の比較(電波暗箱環境)



第6章 電波特性を含めた複数 RF タグエミュレーション手法の提案

図 6.6: 複数 RF タグを並べた場合とエミュレータ使用におけるインベントリ所要スロット数の比較(電波暗箱環境)

図 6.5 から,インベントリ毎の読み取り RF タグ数では,複数 RF タグを読み取って測定した場合と独立試行モデルを実装した BAP を読み取って測定した場合で,差の平均が 1.5%であり,ほとんど差がないことがわかる.

一方で,図6.6から,独立試行モデルを実装したBAPを読み取って測定したインベント リ速度は,複数RFタグを読み取って測定したインベントリ速度と比較して,劣化方向にバ イアスしている.独立試行モデルは,数%程度インベントリ速度が劣化方向にバイアスする 特性がある.しかしながら,比較実験では,例えばインベントリ所要スロット数の平均値を 指標とした場合,BAPでの読み取りは14.1%インベントリが遅くなっており,アルゴリズム の特性を考慮に入れてもバイアス度合いが大きいと考えられる.

6.1.2 検証実験2:室内環境における比較実験

図 6.7 に示すように,ゲート型のアンテナを設置し,室内環境において検証実験を行った. アンテナは地面に対して 20°の傾きを持ち,アンテナ直下の位置を 2.15m 地点とする. RF タグの位置は,地面に対して 1.05m 地点とし,検証実験 1 と同様に,30 個の RF タグを貼り 付けた RF タグボードを使用した.



図 6.7: 検証実験2の概観

本実験環境において,200回のインベントリを行った際に,各インベントリで読まれた RF タグの個数を図 6.8 に示す.



図 6.8: 30 個の RF タグの読み取りにおけるインベントリ毎の読み取り RF タグ数(室内環境)

図 6.8 に示すように,検証実験2の環境で30 個の RF タグボードを読み取った際に,読み 取り可能な RF タグの最大数は28 個である.このように,検証実験2の環境では検証実験1 と異なり,2 個の RF タグは,空間損失により応答の電力が不足してしまう位置にある.そこ で,本実験ではこれを考慮し,BAP におけるエミュレーション RF タグ数の設定値を28 個 とした.また,読み取り環境を近似するために,RF タグボードを読み取った際の RSSIの期 待値と一致するよう,図 6.7 の矢印方向に BAP を移動させて調節を行った.複数 RF タグお よび BAP の読み取りにおいて,インベントリ毎の読み取り RF タグ数をプロットした散布図 を図 6.9 に,インベントリ所要スロット数をプロットした散布図を図 6.10 に示す.



図 6.9: 複数 RF タグを並べた場合とエミュレータ使用におけるインベントリ毎の読み取り RF タグ数の比較(室内環境)



第6章 電波特性を含めた複数 RF タグエミュレーション手法の提案

図 6.10: 複数 RF タグを並べた場合とエミュレータ使用におけるインベントリ所要スロット 数の比較(室内環境)

図 6.9 から,インベントリ毎の読み取り RF タグ数では,複数 RF タグを読み取って測定した場合と独立試行モデルを実装した BAP を読み取って測定した場合で,差の平均が 1.3% であり,検証実験 1 と同様にほとんど差がない.

一方で,図 6.10から,独立試行モデルを実装した BAP を読み取って測定したインベント リ速度は,複数 RF タグを読み取って測定したインベントリ速度と比較して,20.5%インベ ントリが遅くなっている.

6.1.3 検証実験3:BAPの多元接続数を変えて比較

16 個の RF タグのエミュレーションを行う際に, BAP1 台 (1 台の BAP で 16 エミュレー ション), BAP2 台 (1 台の BAP で 8 エミュレーション), BAP4 台 (1 台の BAP で 4 エ ミュレーション), BAP8 台 (1 台の BAP で 2 エミュレーション), BAP16 台 (1 台の BAP で 1 エミュレーション)と, BAP の多元接続台数を変えて比較を行った.比較は, BAP を 有線で読み取る場合と, BAP を無線で読み取る場合の双方に関して行った.BAP を有線で 読み取る場合の実験装置の構成を図 6.11 に,実験図を図 6.12 に示す.



R/W: Reader/WriterD: DividerATT.: AttenuatorBAP: programmable Battery Assisted Passive tag

図 6.11: BAP を有線で読み取る場合の実験装置概略図



図 6.12: BAP を有線で読み取る場合の実験図

BAP を有線で読み取る場合, Divider を用いて同軸ケーブルで BAP16 台を接続する.例 えば,2台の BAP を使用してエミュレーションを行う場合は, BAP #1, BAP #2 でそれ ぞれ 8 個の RF タグのエミュレーションを行い,残りの BAP の電源を切って実験を行う. 一方, BAP を無線で読み取る場合の実験図を図 6.13 に示す.



図 6.13: BAP を無線で読み取る場合の実験図



有線,無線それぞれにおいて,BAPの多元接続数を変え,各1000回のインベントリを行ってインベントリ所要スロット数の平均値を求めた.結果を図 6.14 に示す.

図 6.14: BAP の多元接続数を変えた比較評価

4.3.3 項で示したように, BAP の多元接続台数を変えても理論上は, インベントリ速度に 変化はない.確かに, 有線で読み取る場合は BAP の多元接続台数を変えてもインベントリ 速度に変化はみられない.しかしながら,無線で読み取る場合は BAP の多元接続台数の増加に応じてインベントリ所要スロット数の平均値が少なくなる,すなわちインベントリが高速化される.

6.1.4 キャプチャ効果

6.1.1 項, 6.1.2 項, 6.1.3 項の実験結果の理由は, 複数の RF タグからのアクセス要求が衝突しても電力差によりアクセスが成功する現象である, キャプチャ効果による影響と考えることで説明できる.

6.1.1 項および 6.1.2 項の実験に関して, 複数 RF タグ MAC エミュレーションアルゴリズ ムでは,キャプチャ効果の影響を考えていないため,キャプチャの発生確率に応じて複数 RF タグを並べて読みとった場合よりもインベントリが遅くなると考察できる.

また, 6.1.3 項の実験に関して, BAP の多元接続数の減少に応じて, キャプチャ効果の影響が小さくなるため, インベントリが遅くなると考察できる.2 個の RF タグが衝突する場合を例にして, この理由を説明する.16 個の RF タグのインベントリに関して, 2 個の RF タグが衝突する組み合わせは $_{16}C_2 = 120$ 通りである.16 台の BAP でエミュレーションを行う場合, この 120 通り全てがキャプチャとなる可能性がある.8 台の BAP でエミュレーションを行う場合, 各 BAP において $_{2}C_{2} = 1$ 通りはエミュレーションアルゴリズムで確率的に Collision と判定しているため, キャプチャとなる可能性は $120 - 1 \times 8 = 112$ 通りである.4 台の BAP でエミュレーションを行う場合, 各 BAP において $_{4}C_{2} = 6$ 通りはエミュレーションアルゴリズムで確率的に Collision と判定しているため, キャプチャとなる可能性は $120 - 6 \times 4 = 96$ 通りである.2 台の BAP でエミュレーションを行う場合, 各 BAP において $_{8}C_{2} = 28$ 通りはエミュレーションアルゴリズムで確率的に Collision と判定しているため, キャプチャとなる可能性は $120 - 28 \times 2 = 64$ 通りである.1 台の BAP でエミュレーションを行う場合, キャプチャとなる可能性は 120 - 120 = 0 通りである.このように, BAP の多元接続数の減少に応じて, キャプチャの影響を受けるケースが少なくなることから, インベントリが遅くなると考察できる.

以上に示すように,無線伝播では,インベントリ速度にキャプチャ効果が大きく影響を及 ぼしている.したがって,物理層の影響も含めた任意環境下での複数 RF タグのインベント リ速度を計測するためには,キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアル ゴリズムを実現する必要がある.

6.2 キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴ リズムの提案

UHF 帯 RFID におけるフェージングモデルは LOS (Line of slight) である仲上ライスモデ ルが適用可能であると考えられている.また,仲上ライスフェージング環境では,2個の RF タグからのアクセス要求が衝突した場合がキャプチャ率の決定に支配的である(付録 B).し たがって,これまで Collision と判定していた内,2個の RF タグの Collision の場合,キャプ チャ率分を Collision でなく,Success とすることでキャプチャの影響を含めた複数 RF タグ エミュレーションアルゴリズムを実現することができる [22]. これまでの独立試行モデルでは, RF タグ数, フレームサイズから計算している確率の値 は, Empty となる確率 *E* と Success となる確率 *S* のみであり, Collision となる確率 *C* は, 1 - E - S と単純に計算していた. これに新たに, 2 個の RF タグの Collision となる確率 C_2 を計算し, C_2 をキャプチャされる確率とキャプチャされない確率に分割することでキャプ チャ効果の影響を含めることができる. キャプチャとなる確率を P_c と表すと, キャプチャの 影響を含めた独立試行モデルでのスロットの状態決定の仕組みは図 6.15 となる.



図 6.15: キャプチャの影響を含めた独立試行モデルでのスロットの状態決定の仕組み

6.3 キャプチャ率と希望干渉比の関係のグラフとRSSIの確率密度分 布からのキャプチャ率算出手法の提案

本節では,キャプチャ率と希望干渉比の関係のグラフと,RSSIの確率密度分布からキャプ チャ率を算出する手法を提案する.これにより,6.2節で述べたキャプチャの影響を含めた複 数 RF タグエミュレーションアルゴリズムにキャプチャ率の値を代入し,任意環境下での複 数 RF タグのインベントリ速度を評価・予測することが可能となる.

6.3.1 キャプチャ率と希望干渉比の関係のグラフの作成手法

本グラフは,2個の RF タグを用いて,実験によりリーダ/ライタ受信部での RF タグの 応答電力差(希望干渉比)とキャプチャ率の関係を計測することで作成する.実験装置の構 成を図 6.16 に示す.



R/W: Reader/WriterP-ATT.: Programmable AttenuatorD: DividerBAP: programmable Battery Assisted Passive tagATT.: Attenuator

図 6.16: キャプチャ率実測の実験装置概略図

実験では,任意の希望干渉比を設定し,リーダ/ライタからのコマンドを2個のRFタ グで同一スロットで応答させ,リーダ/ライタの受信部で,衝突した応答が復調できた割合 をキャプチャ率として記録した.初期設定として,リーダ/ライタが有するRSSI測定機能 を用いて,2個のRFタグ(BAP #1 および2)からの応答レベルを個別に計測し,2個の RFタグの応答電力が同一になる減衰量で希望干渉比は0dBとなるよう,Attenuatorおよび Programmable Attenuator における減衰量を調節した.そして,任意の希望干渉比は,2個 のRFタグからの応答の1つ(BAP #1)をProgrammable Attenuatorを用いて調整するこ とにより,設定した.使用したProgrammable Attenuatorの概観を図 6.17に仕様を表 6.1 に 示す.



図 6.17: Programmable Attenuator (MICRONIX MAT800)の概観

Attenuation Range	0.00 - 80.00 dB
Minimum Step	0.05dB
Mode	Manual/Program
Interface	RS232C/GPIB
Insertion Loss	3.90dB for one-way

表 6.1: Programmable Attenuator (MICRONIX MAT800)の仕様

使用した Attenuator の概観を図 6.18 に仕様を表 6.2 に示す.



図 6.18: Attenuator (Agilent 8494B, 8495B)の概観

Attenuation Range	0 - 81dB
Minimum Step	1dB
Insertion Loss	0.33dB for one-way

表 6.2: Attenuator (Agilent 8494B, 8495B)の仕様

本実験で Programmable Attenuator を使用した理由は,減衰量を 0.05dB 単位で調節でき るため,細かく希望干渉比を設定できるからである.Programmable Attenuator だけでなく Attenuator も使用した理由は,同軸ケーブルで接続した場合 BAP への入力信号電力レベル が強すぎることおよび,Programmable Attenuator の挿入損失が大きいためである.同軸 ケーブルで接続,同一のスロットで応答,および RF タグが発する応答パケットのパケット 損失数を測定するため,RF タグとして,プログラマブル電池付きパッシブタグ (BAP)を用 いた.キャプチャ率は,C1G2 プロトコルのアンチコリジョンにおいて RF タグから最も多 く発生する RN16 (プリアンブル+16bit)を最低 10000 パケット応答させ,正しくリーダ/ ライタで復調できた RN16の割合で表した.具体的には衝突した応答をリーダ / ライタが復調できた割合を RF タグ (BAP #2)で観測し,実測した.

実測した希望干渉比とキャプチャ率の関係を図 6.19 に示す. 横軸は希望干渉比を, 縦軸は キャプチャ率を表す.この図から,キャプチャ率は一定ではなく希望干渉比により増減する ことが示された.



図 6.19: 実測したキャプチャ率と希望干渉比の関係

6.3.2 RSSIの確率密度分布の作成手法

RSSIの確率密度分布は,インベントリ速度を評価したい環境下で複数個の RF タグを並べて RSSI を計測し,作成する.RSSIの確率密度分布の例を図 6.20 に示す.



図 6.20: RSSI の確率密度分布の例

6.3.3 キャプチャ率と希望干渉比の関係のグラフと RSSI の確率密度分布からの キャプチャ率算出手法

キャプチャ率と希望干渉比の関係のグラフ(図 6.19)とRSSIの確率密度分布(図 6.20) からキャプチャ率を算出する[23].キャプチャ率と希望干渉比の関係のグラフのある横軸の 値を a_i ,その時の縦軸の値を $C(a_i)$ とし,RSSIの確率密度分布のある横軸の値を x_i ,その 時の縦軸の値を $P(x_i)$ とする(図 6.21).



図 6.21: キャプチャ率算出手法

まず, RSSIの確率密度分布において, RSSIの値を正規化し, 期待値を算出する.式(6.1)

がRSSIの期待値 xを算出する式である.

$$\bar{x} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^{n} \{ 10^{0.1 \cdot x_i} \cdot P(x_i) \}$$
(6.1)

次に,算出した期待値の値を用いて,2個のRF タグが衝突した際にキャプチャして読まれる確率を求める.式(6.2)が2個のRF タグが衝突した際のキャプチャ率 P_{c2} を算出する式である.

$$P_{c2} = \sum [\{P(\bar{x} + a_i) + P(\bar{x} - a_i)\} \cdot C(a_i)]$$

$$codomain : MIN(x_i) \leq \bar{x} - a_i, \bar{x} + a_i \leq MAX(x_i)$$
(6.2)

ここで,3個の RF タグの応答が衝突した際にキャプチャして読まれる確率は,式(6.2) の畳み込みにより算出できる.しかしながら,3個以上の RF タグの応答が衝突した際にキャ プチャして読まれる確率は,2個の RF タグが衝突した際のキャプチャ率に比して非常に小 さいため(付録 B),本提案のキャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションア ルゴリズムでは,2個の RF タグが衝突した際のキャプチャ率を全体のキャプチャ率として 扱っている.したがって,キャプチャ率 $P_c = P_{c2}$ となる.

6.4 本章のまとめ

本章では,検証実験により複数 RF タグを並べた場合と複数 RF タグエミュレータの差を 明確化した.そして,電波特性を含めた複数 RF タグエミュレーションを実現するための手 法として,キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムおよび, キャプチャ率と希望干渉比の関係のグラフと RSSI の確率密度分布からのキャプチャ率算出 手法を提案した.次章では,提案手法の妥当性について性能評価した結果を示す.

第7章 電波特性を含めた複数 RF タグエミュ レーション手法の評価

本章では,キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムに対して 行った評価について述べる.新たにキャプチャ率の指標を独立試行モデルに組み込む場合, アルゴリズムの特性上のエミュレーション精度の劣化,エミュレーションできる RF タグの 最大数の減少が課題となる.そこで,まず,数値シミュレーションによるエミュレーション 精度の評価および,BAP への実装によるエミュレーションできる RF タグの最大数の評価を 行った.数値シミュレーションによるエミュレーション精度の評価を 7.1節,BAP への実装 によるエミュレーションできる RF タグの最大数の評価を 7.2節に示す.そして,次に,リー ダ/ライタで,キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムを実 装した BAP を読み取った場合と,複数 RF タグを読み取った場合の比較評価を 7.3節に示 す.最後に,本研究により実現する電波特性も含めた読み取り速度の評価・予測方法につい て述べる.

7.1 数値シミュレーションによるエミュレーション精度の評価

キャプチャの影響を含めた独立試行モデルのエミュレーション精度を数値シミュレーショ ンにより性能評価した.数値シミュレーションはMATLABのmファイルで行った.数値シ ミュレーションでは,キャプチャの影響を含めた独立試行モデルと,従来のキャプチャの影 響を含めていない独立試行モデルのエミュレーション精度の差異について性能評価を行った. キャプチャの影響を含めたアルゴリズムと従来のアルゴリズムのそれぞれにおいて,フレー ムサイズとRFタグ数を定めた状態で,あらかじめ定めた数のRFタグの読み取りを完了す るまでの総スロット数を平均値,累積確率分布の2つの評価軸で,マルチステートマシンモ デルと比較した.

7.1.1 インベントリ所要スロット数の平均値を評価軸としたエミュレーション精度 の評価

(a) 従来のマルチステートマシンモデル,(b) 従来の独立試行モデル,(c)Pcを0.3(キャ プチャ率平均30%)と設定した場合のキャプチャの影響を含めたマルチステートマシンモデ ル,(d)Pcを0.3と設定した場合のキャプチャの影響を含めた独立試行モデル,(e)Pcを0.6 (キャプチャ率平均60%)と設定した場合のキャプチャの影響を含めたマルチステートマシ ンモデル,(f)Pcを0.6と設定した場合のキャプチャの影響を含めた独立試行モデル,に関 してRFタグ数を20~1000の間で変化させ(解像度20),それぞれインベントリ所要スロッ ト数の計測を10000回行い,平均値を求めた.なお,数値シミュレーションは,フレームサ イズを 256 と固定した静的フレーム ALOHA 方式の条件で行った. インベントリ所要スロット数の平均値を評価軸とした,従来の独立試行モデルとキャプチャの影響を含めた独立試行 モデルのエミュレーション精度の比較結果を図 7.1 に示す.



図 7.1: インベントリ所要スロット数の平均値を評価軸としたエミュレーション精度の評価

図 7.1 で示すように,キャプチャの影響を含めた独立試行モデルでも,従来の独立試行モ デルとほとんど同様のエミュレーション精度で複数 RF タグの挙動をエミュレーションでき ている. RF タグ数 20~1000 の 50 パターンの誤差の平均値を求めた場合,従来の独立試行 モデルでは 6.8%の誤差で近似している.これと比較して,キャプチャの影響を含めた独立試 行モデルで,Pcを 0.3 と設定した場合は 7.8%,Pc を 0.6 と設定した場合は 8.1%の誤差で近 似できている.このように平均値を評価軸とした場合,新たにキャプチャ率の指標を組み込 んでも,アルゴリズムの特性としてエミュレーション精度にほとんど変化を与えないことを 確認できた.

7.1.2 インベントリ所要スロット数の累積確率分布を評価軸としたエミュレーション精度の評価

フレームサイズを 16 と固定した静的フレーム ALOHA 方式において, RF タグ数が 30 の 場合のインベントリ所要スロット数の計測を 10000 回行い, 累積確率分布を求めた. 従来の マルチステートマシンモデルと独立試行モデルの累積確率分布の比較結果を図 7.2 に, Pc を 0.25 と設定した場合のキャプチャの影響を含めたマルチステートマシンモデルと独立試行モデルの累積確率分布の比較結果を図 7.3 に, Pc を 0.5 と設定した場合のキャプチャの影響を 含めたマルチステートマシンモデルと独立試行モデルの累積確率分布の比較結果を図 7.4 に 示す.



図 7.2: インベントリ所要スロット数の累積確率分布を評価軸とした従来モデルのエミュレー ション精度の評価





図 7.3: インベントリ所要スロット数の累積確率分布を評価軸としたキャプチャの影響を含めたモデルのエミュレーション精度の評価 (Pc = 0.25)



図 7.4: インベントリ所要スロット数の累積確率分布を評価軸としたキャプチャの影響を含めたモデルのエミュレーション精度の評価 (Pc = 0.5)

従来の独立試行モデルでは,図7.2に示すように,エミュレーションの誤差はあるものの 全体的な傾向はよく近似している.キャプチャの影響を含めた独立試行モデルでも,図7.3 に示すように,キャプチャ率 Pcが0.25の条件において従来モデルと同様にエミュレーショ ンの誤差はあるものの全体的な傾向はよく近似できていることを確認できた.また,キャプ チャ率の値を変え Pcが0.5の条件にしても,同様の傾向となることを確認できた.

7.2 実装によるエミュレーションできる RF タグの最大数の評価

キャプチャの影響を含めた独立試行モデルを BAP へ実装し,エミュレーション可能な RF タグの最大数の評価を行った.

SRAM モデルを使用した場合,エミュレーションできる RF タグの最大数は,確率以外の 計算処理時間が T_1 以内に収まる場合,メモリ容量によって決まる.従来の独立試行モデル は,確率の値として Empty になる確率 E, Success になる確率 S の 2 つを格納する必要があ る*ため, BAP の SRAM のメモリ容量に依存して 8191 個の RF タグのエミュレーションが 可能となっていた(4.4.2 項).一方で,キャプチャの影響を含めた独立試行モデルでは,新 たに格納する必要がある確率の値は 2 個の Collision になる確率 C_2 だけである.ゆえに,キャ プチャの影響を含めた独立試行モデルでは,4 × 1024 × 1024/16/3 – 1 = 5460 個の RF タ グの確率の計算値を格納することができる.また,キャプチャの影響を含めた独立試行モデ ルで新たに加えた確率以外の計算処理は,確率の計算処理と比較して相対的に小さく,計算 処理時間は T_1 以内に収まることを確認できた.このように,キャプチャの影響を含めた独立 試行モデルでは,最大 5460 個の RF タグのエミュレーションが可能であり,将来市場で要求 される 1000 個と比較して十分な数である.

7.3 複数 RF タグとの比較評価

本節では,リーダ/ライタで,複数RFタグを読み取った場合と,キャプチャの影響を含めた複数RFタグエミュレーションアルゴリズムを実装したBAPを読み取った場合の比較評価について述べる.

7.3.1 電波暗箱環境での比較評価

6.1.1 項に示した電波暗箱環境で,30 個の RF タグを貼り付けた RF タグボードを読み取った場合と,キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムを実装した BAP を読み取った場合のインベントリ速度を比較した.30 個の RF タグを貼り付けた RF タグボードを読み取った場合の RSSI の確率密度分布を図 7.5 に示す.

^{*}厳密には確率の値を 2¹⁶ 倍した 16bit 整数を格納する





図 7.5: RSSIの確率密度分布(電波暗箱環境)

RSSIの期待値 $\bar{x} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^{n} \{10^{0.1 \cdot x_i} \cdot P(x_i)\} = -43.7 = -44$ である.また,キャプチャ率 P_c を図 7.5 と図 6.19 から算出すると, $P_c = P_{c2} = \sum [\{P(\bar{x} + a_i) + P(\bar{x} - a_i)\} \cdot C(a_i)] = 0.18$ となる.そこで,本評価では,RSSIの期待値が -44 となる場所にBAP を配置し,キャプチャ の影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムにおいてキャプチャ率を 18%と 設定してインベントリ速度の合致度を評価した.

複数 RF タグを並べた場合,キャプチャの影響を含めない複数 RF タグエミュレーション アルゴリズムを実装した BAP を使用した場合,キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエ ミュレーションアルゴリズムを実装した BAP を使用した場合のインベントリ所要スロット 数をプロットした散布図を図 7.6 に示す.



第7章 電波特性を含めた複数 RF タグエミュレーション手法の評価

図 7.6: キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムにおける複数 RF タグを並べた場合とのインベントリ所要スロット数の比較(電波暗箱環境)

複数 RF タグを並べた場合とのインベントリ速度の誤差は,キャプチャの影響を含めない 複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムを使用した場合は平均 14.1%の誤差であるのに 対し,キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムを使用した場 合は平均 4.0%の誤差である.このように,本評価結果から,キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムを実装した場合,数値シミュレーションと同様に数 %の誤差で物理層の影響を加味した複数 RF タグの挙動に近似できることを確認できた.

7.3.2 室内環境での比較評価

6.1.2 項に示した室内環境で,30 個の RF タグを貼り付けた RF タグボードを読み取った 場合と,キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムを実装した BAP を読み取った場合のインベントリ速度を比較した.30 個の RF タグを貼り付けた RF タ グボードを読み取った場合の RSSI の確率密度分布を図 7.7 に示す.





RSSIの期待値 $\bar{x} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^{n} \{10^{0.1 \cdot x_i} \cdot P(x_i)\} = -50.0 \$ である. また,キャプチャ率 P_c を 図 7.7 と図 6.19 から算出すると, $P_c = P_{c2} = \sum [\{P(\bar{x} + a_i) + P(\bar{x} - a_i)\} \cdot C(a_i)] = 0.20$ と なる. そこで,本評価では,RSSIの期待値が -50 となる場所に BAP を配置し,キャプチャ の影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムにおいてキャプチャ率を 20% と 設定してインベントリ速度の合致度を評価した.

本評価環境において,複数 RF タグを並べた場合,キャプチャの影響を含めない複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムを実装した BAP を使用した場合,キャプチャの影響を 含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムを実装した BAP を使用した場合のイン ベントリ所要スロット数をプロットした散布図を図 7.8 に示す.



第7章 電波特性を含めた複数 RF タグエミュレーション手法の評価

図 7.8: キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムにおける複数 RF タグを並べた場合とのインベントリ所要スロット数の比較(室内環境)

複数 RF タグを並べた場合とのインベントリ速度の誤差は,キャプチャの影響を含めない 複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムを使用した場合は平均 20.5%の誤差であるのに 対し,キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムを使用した場 合は平均 7.0%の誤差である.このように,評価環境を変化させても,キャプチャの影響を含 めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムを実装した場合,数値シミュレーションと 同様に数%の誤差で物理層の影響を加味した複数 RF タグの挙動に近似できることを確認で きた.

7.4 提案アルゴリズムによる電波特性も含めた読み取り速度の評価・ 予測方法

キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムおよび,キャプチャ 率と希望干渉比の関係のグラフと RSSI の確率密度分布からのキャプチャ率算出手法から,数 %の誤差で物理層の影響を受けた複数 RF タグの挙動に近似できることを 7.3 節に示した.7.3 節の場合,実際に評価したい環境下に BAP を持って行き,RSSI の期待値が一致するように BAP の位置を調節して評価している.本節では,電波特性も含めた大量 RF タグのインベントリ速度を簡単に評価するために,アッテネータの減衰量を調節することで,実際に評価したい環境下に BAP を持って行かなくてもインベントリ速度を評価できることを確認する. キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズム[†]に関して,7.3.1項に示した電波暗箱環境で,複数 RF タグの RSSI の期待値である –44 となる位置に BAP を配置したパターンと, BAP をアッテネータを介して有線でリーダ / ライタと接続し, RSSIの期待値を –44 となるようアッテネータの減衰量を調節したパターンの比較結果を図 7.9 に示す.



図 7.9: 無線伝搬環境と有線(アッテネータの減衰量を調節)のインベントリ所要スロット数の比較

図 7.9 において,電波暗箱環境で測定したインベントリ所要スロット数の平均値と,アッ テネータの減衰量を調節して測定したインベントリ所要スロット数の平均値の誤差は0.4%で あり,ほとんど誤差がない.さらに,電波暗箱環境で測定したインベントリ所要スロット数 の標準偏差と,アッテネータの減衰量を調節して測定したインベントリ所要スロット数の標 準偏差の誤差は2.1%であり,標準偏差でもほとんど誤差がない.このことから,アッテネー

[†]RF タグ数を 30, キャプチャ率を 18%に設定
タの減衰量を調節することで,実際に評価したい環境下に BAP を持って行かなくてもイン ベントリ速度を評価できることを確認できた.

最後に,電波特性も含めたインベントリ速度の予測結果について図7.10 に示す.図7.10 は,キャプチャ率を18%に設定し,RSSIの期待値が-44となるようにアッテネータの減衰 量を調整した上で,エミュレーション RF タグ数を30個から,50個,100個,200個,500 個,1000個と増加させて,200回のインベントリにおけるインベントリ所要スロット数の平 均値を算出したグラフである.RF タグ間の間隔や RF タグの配置方法等によって,インベン トリ速度は変化するものの,実際に RF タグを並べて評価していない個数におけるインベン トリ速度の見通しを立てることができる.このように,本研究により,電波特性を含めた大 量 RF タグのインベントリ速度を簡単に評価・予測することが可能となる.



図 7.10: 電波特性を含めたインベントリ速度の予測結果

7.5 本章のまとめ

本章では,キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムに対し て行った評価について述べた.数値シミュレーションによるエミュレーション精度の評価に より,複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムに新たにキャプチャ率の指標を組み込ん でもアルゴリズムの特性上のエミュレーション精度の劣化がないことを示した.また,新た にキャプチャ率の指標を組み込んでもエミュレーションできる RF タグの最大数の減少が問 題とならず,十分な個数の RF タグのエミュレーションが可能であることを示した.さらに, リーダ / ライタで, 複数 RF タグを読み取った場合と, キャプチャの影響を含めた複数 RF タ グエミュレーションアルゴリズムを実装した BAP を読み取った場合の比較評価を行い, 数 値シミュレーションと同様に数%の誤差で物理層の影響を加味した複数 RF タグの挙動に近 似できることを示した.これにより,物理層の影響を加味した大量 RF タグのインベントリ 速度を簡単に評価・予測することが可能となる.次章では,本研究を総括した全体的な結論 と今後の課題を述べる.

第8章 結論と今後の課題

本章では,本論文の結論と,今後の課題についての展望を示す.

8.1 結論

本論文では,以下の2つを実現した.

1 つ目に,複数の RF タグの MAC プロトコルの挙動をエミュレーションする 2 つの効率 的なエミュレーションアルゴリズムを提案し,数値シミュレーションおよび,8bit MPU を 有するプログラマブル電池付きパッシブタグに実装して性能評価を行った.

複数 RF タグの挙動は,確率的特性を考慮して1つのステートマシンでエミュレーション することが計算処理時間の面から効率的である.従属試行モデルは,複数 RF タグの MAC プロトコルの挙動を正確にエミュレーションすることができるが,計算負荷が比較的大きい. 独立試行モデルは,複数 RF タグの挙動を数%の誤差で近似でき,従属試行モデルよりも大 幅に計算の効率化ができる.提案アルゴリズムを BAP へ実装した場合,計算を効率化する ことで,従属試行モデルでは7個の RF タグ,独立試行モデルでは38 個の RF タグのエミュ レーションが可能である.さらに,独立試行モデルの特性を生かした SRAM モデルにより, 8191 個の RF タグのエミュレーションが可能となる.これにより,計算能力が乏しいエミュ レータ機器を用いても,リーダ/ライタの MAC プロトコルを共通の基準において簡単に比較 評価することが可能になる.

2 つ目に,キャプチャの影響を含めた複数 RF タグエミュレーションアルゴリズムおよび, キャプチャ率と希望干渉比の関係のグラフと RSSI の確率密度分布からのキャプチャ率算出 手法を提案し,同じく数値シミュレーションおよび,8bit MPU を有するプログラマブル電 池付きパッシブタグに実装して性能評価を行った.

RSSIの期待値を一致させた状況下で評価しても,複数 RF タグエミュレータを用いて計測 したインベントリ速度は,複数 RF タグを並べて読み取った場合よりも遅くなる.この問題 は,複数の RF タグからのアクセス要求が衝突しても電力差によりアクセスが成功する現象 である,キャプチャ効果の影響を考慮することで解決できる.新たにキャプチャ率の指標を 独立試行モデルに組み込む場合,アルゴリズムの特性上のエミュレーション精度の劣化,エ ミュレーションできる RF タグの最大数の減少が課題となる.提案したキャプチャの影響を 含めた独立試行モデルでは,エミュレーション精度を従来モデルと近似できる.また,エミュ レーションできる RF タグの最大数も 5460 個と十分な個数を満たすことができる.さらに, 提案したキャプチャ率と希望干渉比の関係のグラフと RSSI の確率密度分布からのキャプチャ 率算出手法により算出したキャプチャ率を提案アルゴリズムに代入することにより,数値シ ミュレーションと同様に数%の誤差で,電波特性を含めた複数 RF タグの挙動に近似できる. これにより,電波特性を含めた大量 RF タグのインベントリ速度を簡単に評価・予測するこ とが可能になる.

8.2 今後の課題

本節では、今後の課題として「Moving RF Tag Emulation」、「Virtual RFID Portal」、「Virtual RFID System」の実現について述べる.

8.2.1 Phase1 : Moving RF Tag Emulation

RFID エミュレーションの拡張の Phase1 として, RF タグを移動させた場合の RSSI の確 率分布をプログラマブルアッテネータで模擬することを計画している.現在, Auto-ID Lab. Japan で, Moving RF Tag Emulation への礎として,位置に応じた複数 RF タグの応答のエ ミュレーションを実現している [24]. Moving RF Tag Emulation が実現できた場合, RF タ グの移動範囲や移動速度を変化させた場合のインベントリ状況 (インベントリ速度,読み取 り RF タグ数, etc)を簡単に評価できる.



Moving RF Tag Emulation の実現イメージを図 8.1 に示す.

R/W: Reader/Writer P-ATT.: Programmable Attenuator BAP: programmable Battery Assisted Passive tag

図 8.1: Moving RF Tag Emulation の実現イメージ

8.2.2 Phase2 : Virtusl RFID Portal

RFID エミュレーションの拡張の Phase2 として,複数のリーダ/ライタが存在する環境下 での無線干渉を信号発生器で模擬することを計画している. これと Phase1 を組み合わせる ことで,特定の読み取りサイトを仮想的に構築できる. これにより読み取りサイト調整(リー ダ/ライタのアンテナの位置, RF タグの位置,リーダ/ライタの出力,etc)の手間を大幅 に削減できる.

Virtual RFID Portal の実現イメージを図 8.2 に示す.



R/W: Reader/Writer P-ATT.: Programmable Attenuator SG: Signal Generator BAP: programmable Battery Assisted Passive tag CIR: Circulator

図 8.2: Virtual RFID Portal の実現イメージ

8.2.3 Phase3 : Virtual RFID System

RFID エミュレーションの拡張の Phase3 として, EPCglobal Network[25] と Phase2 を連 携させることを計画している. EPCglobal Network は, SCM 上でオブジェクトを自動識別し, そのオブジェクトの識別情報を企業内あるいは企業間でシェアする技術である. EPCglobal Network は,現在ネットワーク型 RFID システムのデファクトスタンダードとなっている. 代表的な構成要素は,リーダ / ライタ [1],フィルタリング&コレクション(RFID ミドル ウェア)[26], EPCIS キャプチャリングアプリケーション[27], EPCIS アクセシングアプリ ケーション[27], EPCIS レポジトリ[27],ONS[28] である. EPCglobal Network は, Auto-ID Lab. Swiss からオープンソース [29]*が公開されている. これと Phase2 を組み合わせること で,例えば図 1.1 に示すような,企業間に渡る家電製品のライフサイクルマネージメントの 模擬データを1つの空間で全て作り出し,検証できる.

Virtual RFID System の実現イメージを図 8.3 に示す.

^{*}ただし ONS は実現されていないため実装する必要がある



R/W: Reader/Writer P-ATT.: Programmable Attenuator SG: Signal Generator BAP: programmable Battery Assisted Passive tag CIR: Circulator

図 8.3: Virtual RFID System の実現イメージ

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導をいただきました慶應義塾大学環境情報学部教授村井純 博士、同学部教授中村修博士、政策・メディア研究科講師羽田久一博士、同研究科助教稲葉 達也氏、同研究科助教鈴木茂哉氏、同研究科助教中根雅文氏に感謝いたします.

そして,修士在籍中に最もお世話になった慶應義塾大学 環境情報学部准教授 三次仁博士に 深く感謝いたします.三次博士には,自身がお忙しい中で論文執筆や研究そのものをどのよ うに進めるべきかについて相談に乗っていただき,様々な助言を頂きました.三次博士のご 指導なくしては,本論文は存在しえませんでした.重ねて感謝いたします.

研究室生活において常に苦楽を共にしてきた,Auto-ID ラボラトリの研究室の仲間である, 慶應義塾大学 政策・メディア研究科 修士課程 江村桂吾氏,佐藤泰介氏,佐藤龍氏,田村哲 朗氏,柳由美氏,同大学 環境情報学部 金仙麗氏,山口修平氏,能島良和氏,廣石達也氏,山 田真弘氏,同大学 総合政策学部 杉本健一氏,須山哲氏,富田千智氏,米村茂氏,小澤みゆ き氏に感謝いたします.特に杉本健一氏には著者の投稿論文の英語についてサポートしても らいました.

また,修士課程において特にお世話になりました,Auto-ID ラボラトリの卒業生である, 電気通信大学 電気通信学部 川喜田佑介博士,日本 IBM 株式会社 苧阪浩輔氏,NTT コミュ ニケーションズ株式会社山本彰氏,Auto-ID ラボラトリの元出向研究員である,パナソニッ クCCソフト株式会社 徳増理氏,株式会社日放電子 白石雅彦氏に心より感謝申し上げます.

さらに,研究を進めるにあたり,ご助言をいただきました村井研究室のファカルティの皆様,論文の追い込み時期を共にした村井研究室同期の奥村祐介氏,金井瑛氏,空閑洋平氏, 町田啓太氏をはじめとする村井研究室の仲間に感謝いたします.ありがとうございました.

最後に,これまで生活面において常に支えてくれた家族に深く感謝し,本論文の謝辞とさせていただきます.

2009年1月9日 神谷尚保

参考文献

- EPCglobal. Class 1 Generation 2 UHF Air Interface Protocol Standard Version 1.1.0, 2005.
- [2] T. Yoshimura. RFID: Expectation and Requirement from Consumer Electronics Industry. Proceedings of APMC 2006 workshop on Emerging Technologies and Applications of RFID, pp. 121–124, 2004.
- [3] Aerospace ID. http://www.aero-id.org, 2007.
- [4] D. Molnar and D. Wagner. Privacy and security in library RFID: issues, practices, and architectures. Proceedings of the 11th ACM conference on Computer and communications security, pp. 210–219, 2004.
- [5] D. Zhen-hua, L. Jin-tao, and F. Bo. Radio Frequency Identification in Food Supervision. 9th International Conference on Advanced Communication Technology, Vol. 1, pp. 542–545, 2007.
- [6] A. Lahtela, M. Hassinen, and V. Jylha. RFID and NFC in healthcare: Safety of hospitals medication care. *Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, 2008. *PervasiveHealth 2008. Second International Conference on*, pp. 241–244, 2008.
- [7] One RFID Tag From Cradle to Grave. RFID journal, 2008.
- [8] EPCglobal. RFID Based Electronic Article Surveillance. In EAS Joint Requirements Group Meeting, 2008.
- [9] K. Finkenzeller. RFID Handbook Second Edition. Wiley, 2003.
- [10] Harald Vogt. Multiple object identification with passive RFID tags. In *IEEE Inter. Conf. SMC '02*, Vol. 3, pp. 6–9, 2002.
- [11] Wen-Tzu Chen and Guan-Hung Lin. An efficient anti-collision method for tag identification in a RFID system. *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E89-B, No. 12, pp. 3386–3392, 2006.
- [12] 川喜田佑介, 三次仁, 中村修, 村井純. キャプチャ効果を利用する UHF 帯 RFID インベントリの高速化. 信学誌, Vol. J91-B, No. 10, pp. 1279–1286, 2008.
- [13] データキャリア用語: Jis x0500, 2002.

- [14] Jin Mitsugi and Osamu Tokumasu. A Practical Method for UHF RFID Interrogation Area Measurement Using Battery Assisted Passive Tag. *IEICE Trans. Commun*, Vol. 91, No. 4, pp. 1047–1054, 2008.
- [15] Chun Wang, Zhenhai Shao, and Masayuki Fujise. Design of upper-layer protocol emulator for SDR prototype of IEEE 802.11g and Bluetooth. *Communications and Information Technology, 2004. ISCIT 2004. IEEE International Symposium on*, Vol. 2, pp. 1118–1121, 2004.
- [16] Rich Redemske and Rich Fletcher. Design of UHF RFID Emulators with Applications to RFID Testing and Data Transport. Proceedings of 4th IEEE Conference on Automatic Identification Technologies, pp. 193–198, 2005.
- [17] ペリテック社 web ページ. http://rfidtest.jp.
- [18] ISO/IEC. ISO/IEC 18000-6 Information technology Radio frequency identification for item management Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz AMENDMENT 1: Extension with Type C and update of Types A and B, 2006.
- [19] 神谷尚保, 三次仁, 中村修, 村井純. 複数 RF タグ・エミュレータの開発 基本アルゴ リズムの検討 - . 2008 信学総大(基礎・境界), A-20-4, 2008.
- [20] 神谷尚保, 三次仁, 中村修, 村井純. UHF 帯 RFID における複数 RF タグの効率的なエ ミュレーションアルゴリズム. 信学技報, SIS2007-74, Vol. 107, No. 547, pp. 35–40, 2008.
- [21] 神谷尚保, 三次仁, 中村修, 村井純. 複数 RF タグ・エミュレータを用いたリーダ / ライ タ MAC プロトコルの実測評価. 2008 信学ソ大(基礎・境界), A-20-11, 2008.
- [22] 神谷尚保, 三次仁, 川喜田佑介, 杉本健一, 中村修, 村井純. UHF 帯 RFID における電波 特性を含めた複数 RF タグエミュレーション. 信学技報, SIS2008-49, Vol. 108, No. 334, pp. 39-44, 2008.
- [23] 神谷尚保, 三次仁, 杉本健一, 中村修, 村井純. 電波特性を含めた複数 RF タグ・エミュ レータの実測評価. 2009 信学総大(基礎・境界), 2009.
- [24] 杉本健一,神谷尚保,三次仁,中村修,村井純. 配置を考慮した複数 RF タグエミュレー ション. 2009 信学総大(基礎・境界), 2009.
- [25] EPCglobal. The EPCglobal Architecture Framework Version 1.2, 2007.
- [26] EPCglobal. The Application Level Events (ALE) Version 1.0, 2005.
- [27] EPCglobal. EPC Information Services (EPCIS) Version 1.0, 2007.
- [28] EPCglobal. Object Naming Service (ONS) Version 1.0, 2005.
- [29] Fosstrak. http://www.fosstrak.org, 2008.

- [30] Michele Zorzi. Capture probabilities in random-access mobile communications in the presence of racian fading. *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. 46, No. 1, pp. 96–101, 1997.
- [31] Jaime Sanchez and David R. Smith. Capture probability in rician fading channels with power control in the transmitters. *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 50, No. 12, pp. 1889–1891, 2002.
- [32] I. Widipangestu, A.J.'T. Jong, and R. Prasad. Capture probability and throughput analysis of slotted ALOHA and unslotted np-ISMA in a Rician/Rayleigh environment. *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. 43, No. 3, pp. 457–465, 1994.
- [33] 細矢良雄. 電波伝搬ハンドブック. リアライズ社, 1999.

付 録 A C1G2 プロトコルにおけるインベン トリ手順

C1G2 プロトコルにおけるインベントリの例(フレームサイズ = 4, RF タグ数=3)を図 A.1 に示す.



図 A.1: C1G2 プロトコルにおけるインベントリ例

インベントリ手順は以下の通りである.

- 1. リーダ / ライタは, ビットマスクを用いて, 指定された RF タググループを選択する ための Select コマンドを送信する.
- 2. リーダ / ライタは , フレームサイズを指定する Q 値 (2^Q がフレームサイズと等しい) を含む Query コマンドを送信する .
- フレームが開始され、それぞれの RF タグは乱数発生器を用いてフレーム内のスロットを選択する.同時に、RF タグは、RF タグ自身を識別する16ビットの乱数メッセージ(RN16)を作成する.もし、RF タグのスロットカウントが0に到達した場合、この RN16 が応答される.
- Query コマンド送信後, リーダ / ライタは RF タグ内部のスロットカウントを減算させる QueryRep コマンドを送信する.この場合も, RF タグのスロットカウントが0 に到達した際に,この RN16 が応答される.Query および QueryRep コマンド送信後, リーダ / ライタの対応は以下の(a)~(c) のうちの1 つである.
 - (a) スロット内で1つの RF タグが応答した場合 (Success), リーダ / ライタは, RF
 タグのスロット占有を承認するため, その RF タグの RN16 を含む Ack コマンド
 を送信する.承認された RF タグは, Electronic Product Code (EPC:ユニーク)

ID) を送信する. EPC の送信に成功した RF タグは, アンチコリジョン処理が終 了するまでコマンドに応答しない.

- (b) スロット内で複数の RF タグが応答した場合 (Collision), リーダ / ライタは, 衝
 突してしまった RN16 を単一の RN16 として承認しようとするか, RN16 のプリ
 アンブル検出に失敗する.
- (c) スロット内で RF タグが1つも応答しない場合 (Empty), リーダ / ライタは, どのコマンドも送信しない。
- 5. リーダ / ライタは, QueryRep コマンドの送信をスロットを進行するために繰り返す. フレーム内の全てのスロットが終了した際, リーダ / ライタは QueryAdjust コマンド を送信し,次のフレームを開始する.この際, EPC 送信が完了していない RF タグの スロットカウントは再設定される.
- 6. リーダ / ライタは,全ての RF タグが EPC を送信するまでフレームを繰り返す.

付 録 B 仲上-ライスフェージング環境におけ る衝突 RF タグ数とキャプチャの関係

付録 B では, [12] で述べられている仲上-ライスフェージング環境における衝突 RF タグ数 とキャプチャの関係について記載する.

キャプチャ可能性は,それぞれの RF タグの応答とそのリーダ/ライタでの受信電力の関係で議論をすることができる [30][31][32].はじめに,2個の RF タグからの応答が衝突する ことを考える.RF タグとリーダ/ライタは見通し関係にあるのでリーダ/ライタの受信波 電力 r は式 (B.1)の仲上ライス分布による確率密度関数 (Probability Distribution Function, PDF) として次のようにあらわすことができる [33].

$$PDF2(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0(\frac{rA}{\sigma^2})$$
(B.1)

ただし, σ は仲上ライス分布の標準偏差,Aは定常波の振幅, I_0 は第1種の0次変形ベッセル 関数である.以降の記述でPDFkのkは,同一スロットを選択した RF タグ数を意味する. PDFを特徴付けるものとして,定常波と散乱波の電力比はライス係数Kと呼ばれ,式(B.2) で示されるライス係数Kで表すことができる.

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \tag{B.2}$$

 $\frac{r}{\sqrt{(A^2+2\sigma^2)}}$ で正規化した電力と PDF2(r) による PDF の 1 例 (PDF2, $\sigma = 0.7$, A = 1, K = 1) と,その累積分布関数 (Cumulative Distribution Function, CDF) の例 CDF2 を図 B.1 に示す.



図 B.1: 正規化した RF タグからの受信電力の確率密度関数 (PDF) と累積分布関数 (CDF) の例

伝搬モデルが構築され PDF が決定できた場合,このグラフを用いてキャプチャ効果の有無を議論できる.この例では,希望波の正規化後電力の期待値を r_d ,干渉波との電力比 3dBでキャプチャが発生するとすると, $CDF2(\frac{r_d}{2})$ の2倍(2個の RF タグのどちらが読み取れてよいため)つまり 0.3 がキャプチャ率 P_c となる.

次に 3 つ以上の RF タグの応答が衝突する場合を議論する.2 つの干渉波のパケットの合計の電力分布を *PDF*3 とすれば,式 (B.1)の畳み込みにより式 (B.3)を得る.

$$PDF3 = \lim_{x \to \infty} \int_0^x PDF2(x-y) \cdot PDF2(y)dy$$
(B.3)

PDF3から得た CDFを CDF3とすれば, CDF3のキャプチャ率 $P_c = 0.0078$ となり CDF2(=0.3)に比して非常に小さい.同様にして求めた PDFk および CDFkを図 B.2 に示す.



図 B.2: 2つ以上の干渉波のパケットが希望波のパケットに衝突する場合の PDF および CDF のグラフ

このグラフから,キャプチャ率の決定に支配的なのはCDF2のみであり,CDF3以降は 実質的に無視できることが分かる.ライス係数Kを変更した場合でも同様にCDF2が支配 的である.