

卒業論文 2010年度(平成22年)

大量センサーノードへの効率的ファームウェア配送法

慶應義塾大学 総合政策学部

学籍番号：70710352

米村 茂

大量センサノードへの効率的ファームウェア配送法

近年，ユビキタスプラットフォーム技術は人と人，人とモノ，モノとモノと繋ぐ技術として開発が進められており，その基盤としてワイヤレスセンサネットワークの普及は必要不可欠である．ワイヤレスセンサネットワークの普及には，大量のセンサノードを広域に長期的，多様な目的のために展開し，管理できることが求められる．

本研究はセンサネットワークへのこれらの要求を満たすための課題のひとつ，ファームウェア配送の効率化を目的とする．大量のセンサデバイスの回収，ファームウェア更新，再配置はコストが大きい．よってセンサノードへ OTA (Over The Air) でファームウェアを配送することが望ましいが，ワイヤレスセンサネットワークは，低帯域，高遅延という特性上，ファームウェアを大量のノードへユニキャストすることは困難であり，マルチキャスト通信の使用が適切である．マルチキャスト通信はパケットの到達確認を行わないという特性上，誤りが無い回線状況で有効である．一方，誤りがある状況で確実に転送するのであれば，センサネットワークの通信プロトコルで再送制御を行うことが有効である．ただし再送制御を行う場合には，Ack を待つ時間によって通信速度が劣化する．マルチキャスト通信の信頼性向上にはパケット符号化が有効であるが，センサデバイスは計算資源に乏しく，複雑なパケット符号化は困難である．本論文はセンサネットワークの通信性能はノード数，ホップ数の増加により劣化することを示し，改善案としてセンサネットワークに適したパケット符号化を用いた通信方式を提案し，ZigBee (IEEE 802.15.4) を用いた実装により，再送制御を用いない約 60kbps の通信で 2 ホップ時に 0.14%，3 ホップ時に 2.4% の割合で発生するパケットロスを，符号化率 2/3 のパケット符号化を用いることにより全て復元でき，2/3 の通信速度で通信できることを明らかにした．

キーワード

1. センサネットワーク, 2. ZigBee, 3. パケット符号化

慶應義塾大学 総合政策学部

米村 茂

An efficient firmware delivery to wireless sensor nodes

Ubiquitous platform technology establishes new communications among people and things. Wireless sensor network is an essential part of the ubiquitous platform technology. Management of a wireless sensor network entails a significant burden to network administrators because the large number of sensor nodes needs to be monitored and updated properly. This paper proposes an efficient firmware distribution by “ on the air ” to a number of distant sensor nodes. Multicast communications is effective to deliver an identical data file to many terminals. But in general, multicast system does not receive acknowledgements from its correspondences. Therefore, the usage of multicast for firmware delivery is only limited to good radio environment. On the other hand, exchanging acknowledgements between a sender and its receiver is a usual practice. This way, the communication speed is degraded because of the time for acknowledgements. In this paper, a packet coding for ZigBee network is proposed. A packet coding provides a flexible mechanism to change the error correction ratio. The proposed method is implemented to a ZigBee network and its performance was evaluated. It was revealed that the proposed method enables five times faster communications than that of acknowledge based protocol. A 2/3 packet coding successfully fixes 2.4% packet loss in three hop sensor network.

Keywords :

1 . Sensor network, 2. ZigBee, 3. Packet coding

Keio University , Faculty of Policy Management

Shigeru Yonemura

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	背景	1
1.3	本研究の目的	3
1.4	本論文の構成	3
第2章	ワイヤレスセンサネットワーク	4
2.1	IEEE 802.15.4 と ZigBee	4
2.1.1	IEEE 802.15.4	4
2.1.2	ZigBee プロトコルスタック	5
2.1.3	ZigBee ネットワーク	6
2.1.4	ZigBee ルーティング	7
2.1.5	ZigBee フレーム	8
2.1.6	ZigBee マルチキャスト	9
2.2	本章のまとめ	9
第3章	ZigBee PAN の通信性能評価	10
3.1	評価目的	10
3.2	計測項目	10
3.3	評価実験	10
3.3.1	評価環境	11
3.3.2	実験の概要	11
3.3.3	実験の結果と考察	14
3.4	本章のまとめ	16
第4章	効率的なデータ配送	17
4.1	提案手法の目的	17
4.2	パケット符号化	18
4.3	マルチキャストにおけるパケット符号化	18
4.3.1	Tornado 符号	18
4.4	センサネットワークにおけるパケット符号化	19
4.5	本章のまとめ	20

第5章	実装	21
5.1	パケット符号化の実装	21
5.1.1	送信ノード	21
5.1.2	受信ノード	22
5.2	本章のまとめ	23
第6章	評価	25
6.1	評価方針	25
6.2	結果と考察	25
6.3	本章のまとめ	27
第7章	結論	28
7.1	本論文のまとめ	28
7.2	今後の課題と展望	28
	謝辞	31

目次

1.1	デジタルサイネージ実験で本学 SFC 構内に展開した PANs	2
1.2	センサネットワークを用いた服薬見守りのシステム概要図	3
2.1	IEEE 802.15.4 MAC フレームフォーマット	5
2.2	ZigBee stack	6
2.3	ZigBee ノードの種類	7
2.4	ZigBee APS フレームフォーマット	8
3.1	機材写真 . SNA , cc2530EB , cc2530BB , cc2530EM	12
3.2	ZigBee の通信速度とエラー率	13
3.3	ZigBee の Ack を使用した通信速度とエラー率	13
3.4	ノード数 1 の場合の Ack 間隔	14
3.5	ノード数 5 の場合の Ack 間隔	14
3.6	ルータによる転送の時間間隔の累積分布	15
4.1	通信方法の比較	17
4.2	Tornado 符号のレイヤ構造	18
4.3	Tornado 符号の二部グラフ	19
5.1	送信ノードのフローチャート	22
5.2	受信ノードのフローチャート	23
5.3	パケットの処理順	23
5.4	改善後の受信ノードのフローチャート	24
6.1	各通信方法の通信速度とパケットロス率	26
6.2	インターバル追加時の通信速度とパケットロス率	27

表 目 次

3.1 実験のネットワーク構成	12
-----------------------	----

第1章 序論

1.1 はじめに

近年、ICT (Information and Communication Technology) は様々な技術革新をへて成熟化しつつあり、我々の日常生活に深く浸透し、社会インフラとしての重要性も増してきている [1] . その中でユビキタスプラットフォーム技術は医療、見守り、防犯、防災、環境、農業、工業など多様なシーンにおいて人と人、人とモノ、モノとモノとの通信を可能とする技術として今後も技術開発が進むと予想される。ユビキタスプラットフォームにより、家庭では照明室温などの環境情報や、人の心拍、血圧、体温を、人の進入しづらい災害地では温度、煙などの多様なセンシングデータを遠隔で収集、モニタリングできるようになる。ユビキタスプラットフォームの実現にはその基盤としてワイヤレスセンサネットワークの普及は必要不可欠である。ワイヤレスセンサネットワークの普及には、センサノードの数の増加、センサネットワークの目的の多様化、その展開範囲の広域化に対応が必要である。また、センサを取り付ける対象も家具や樹木など固定されたモノだけでなく、車や人などの移動体に取り付けるシーンへの対応も必要である。このように多種多様、大量に広域展開されたセンサノードを長期間利用するシーンではこれらのセンサノードを一括して遠隔から管理できることが求められる。

1.2 背景

センサネットワーク管理の課題の一つとしてセンサデバイスのファームウェアアップデートがある。現在、センサデバイスのファームウェアアップデートなどの、デバイスへの大量のデータ書き込みは、センサデバイスを回収して手元で行うケースが多い。センサネットワークを広範囲、長期的かつ大量に展開、運用するシーンにおいてこれは非常に大きなコストとなる。以下に今までに行ったセンサネットワークの実験を示し、その際に気づいた点を述べる。

デジタルサイネージ実験 2009年1月

本学湘南藤沢キャンパスとその最寄り駅の湘南台周辺の飲食店でのデジタルサイネージ(電子広告)の実験。学生に ZigBee ノードを携帯してもらい、サイネージがその前にいる利用者にマッチする情報を出力し、位置情報を利用した利用者へのフィードバックを実証した。この実証実験ではファームウェアアップデートはセンサデバイスを全て回収し、有線(JTAG)を用いて行っていた。有線によるファームウェア

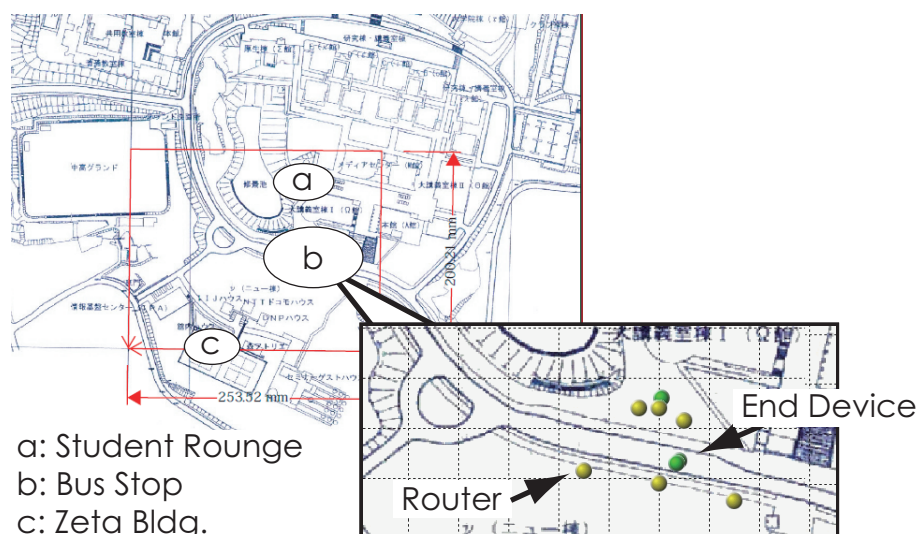


図 1.1: デジタルサイネージ実験で本学 SFC 構内に展開した PANs

アップデートにはひとつのセンサデバイスあたり約 1 分を要する．最多で 200 個程度，小規模の試行ごとに 10 個程度のセンサデバイスのアップデートを行った．センサデバイスの回収作業の時間も加味すると，ファームウェアアップデートの作業に相当な時間がかかった．

センサネットワークを用いた服薬見守り [2][3] 2010 年 8 月～

医療現場では，在宅療養を希望しているにもかかわらず入院している患者や施設入居者，不安を抱きつつ在宅療養をしている患者や医療者が大勢いる．この課題に対し，在宅療養患者の服薬管理と見守りの課題を明らかにした上で，ICT を用いた服薬見守りシステムの構築と実証 実験を行い，評価をした．この実験では協力していただいた患者宅にセンサネットワークを構築したため，ファームウェアの更新には全ての患者宅からセンサデバイスを回収する必要があった．

上に示すどちらの場合も管理は一つの場所で行っているが，管理対象となるセンサネットワーク，センサノードが地理的に離れている．このように展開されたセンサネットワークにおいては，広域ネットワークと連携し，センサノードへの OTA (Over The Air) によるファームウェアなどの大きいデータを遠隔値から配送できることが求められる．しかし，ワイヤレスセンサネットワークは，低帯域，高遅延という特性上，大きいデータを大量のノードへユニキャストすることが困難であり，マルチキャスト通信によるデータ配送を検討すべきである．しかし，マルチキャスト通信はネットワーク上のトラフィックを抑えられるが，パケットの到達確認を行わないという特性のため通信の信頼性に難がある．

1.3. 本研究の目的

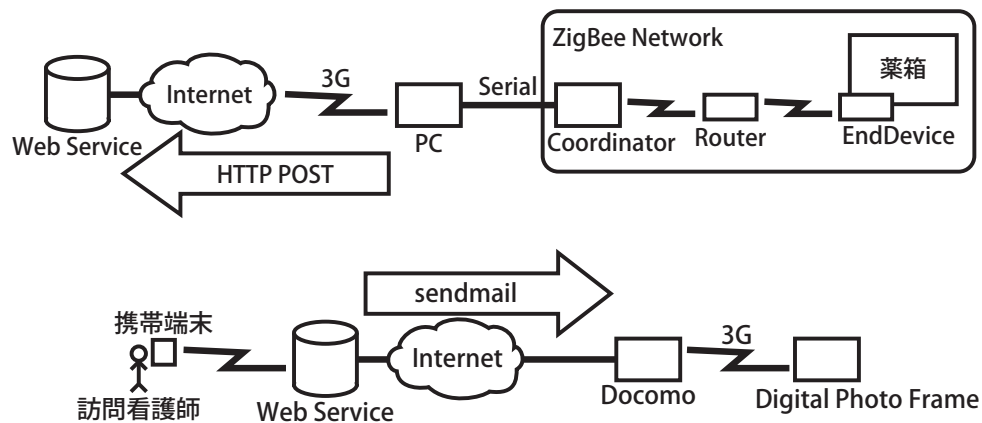


図 1.2: センサネットワークを用いた服薬見守りのシステム概要図

1.3 本研究の目的

本研究ではセンサネットワークの管理における課題の一つ，大量のセンサノードにおけるデータ転送を実現するために，センサネットワークに適切なパケット符号化を用いてマルチキャスト通信の信頼性を向上させることを目的とする．

1.4 本論文の構成

本論文は全7章で構成される．第2章ではセンサネットワークについての基本事項を述べる．第3章ではセンサネットワークの通信環境についての評価と考察を行う．第4章ではセンサネットワークにおける通信の改善手法を提示する．第5章では本研究の提案手法の有効性を示すための実験の設計を示す．第6章では実験の結果と考察を述べる．第7章では結論と今後の課題をまとめる．

第2章 ワイヤレスセンサネットワーク

本章では、本研究が使用するワイヤレスセンサネットワークについての概要を述べる。本研究ではセンサネットワークを構成する通信技術として、ZigBee [4] を前提とする。ZigBee は次のような特徴を持っている。

- 低消費電力
- マルチホップネットワーク
- アドホックネットワーク
- 低データレート
- ワンチップの小型実装が多数存在

ZigBee はきわめて低消費電力なプロトコルであり、マルチホップかつアドホックなネットワークを構成できる。そのため、柔軟なネットワークの展開が容易である。これらの特徴を持つ ZigBee は ZigBee Alliance により仕様化され標準規格となっている。ZigBee はその物理通信とメディアアクセスに IEEE 802.15.4 [5] を利用する。

2.1 IEEE 802.15.4 と ZigBee

2.1.1 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 は低消費電力な無線通信のプロトコルであり、IEEE により仕様化され、標準規格となっている。IEEE 802.15 シリーズは無線データ通信のプロトコルを定めたプロトコルシリーズであるが、IEEE 802.15.4 はその中でも特に組み込み機器などの相互通信のために設計されている。その目的のために、低データレートで省電力の物理通信方式を利用し、複雑でないプロトコル設計となっている。IEEE 802.15.4 では構成される近距離通信のネットワークは WPAN (Wireless Personal Area Network)、または PAN (Personal Area Network) と呼ばれる。

PHY レイヤ

IEEE 802.15.4 の PHY (物理) レイヤについて述べる。IEEE 802.15.4 は ISM (Industry-Science-Medical) 目的の周波数帯である、2.4 GHz 帯と 900 MHz 帯が使用でき、日本では 2.4 GHz 帯のみが使用可能である。機器が技術基準適合証明を

2.1. IEEE 802.15.4 と ZIGBEE

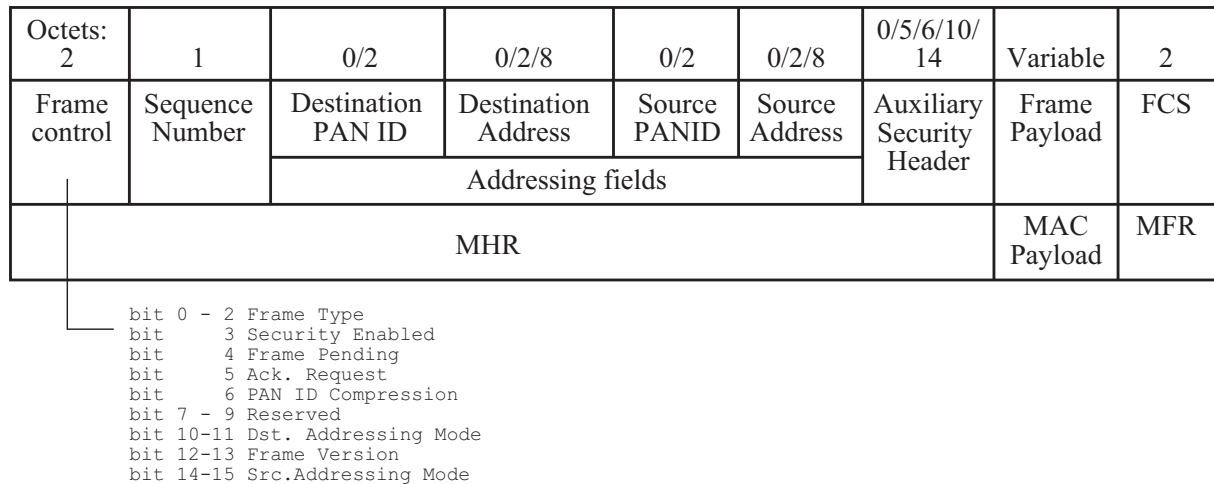


図 2.1: IEEE 802.15.4 MAC フレームフォーマット

受けていれば無線局免許を受ける必要なく利用できる。実測によると、屋外で 100m 程度、屋内では数十 m 程度の距離で通信が可能である。

MAC レイヤ

IEEE 802.15.4 の MAC (Medium Access Control) レイヤについて述べる。まず、IEEE 802.15.4 で使用する 2 種類の識別子を述べる。

- PAN ID IEEE 802.15.4 のネットワークである PAN の識別子。16 ビット長。
- MAC アドレス PAN 内でのノードの識別子。PAN 内で一意な 16 bit 長のショートアドレスと、IEEE から割り当てを受ける 64 bit 長のロングアドレスの 2 種類がある。

MAC フレームのフォーマットを図 2.1 に示す。PAN ID 及び MAC アドレスのそれぞれについて、Source および Destination が指定可能である。ブロードキャスト時には PAN ID、MAC アドレス (ショートアドレス) 共に宛先アドレスとして 0xffff を利用する。必要がない場合は省略も可能であり、またロングアドレス、ショートアドレスの選択はヘッダーの中の Frame Control にて指定する。

2.1.2 ZigBee プロトコルスタック

ZigBee スタックは他のプロトコルスイートと同様に、いくつかのレイヤで構成される。PHY と MAC は IEEE 802.15.4 のものを利用する。その上位に、マルチホップでネットワークを構成するための Network (NWK) レイヤがある。そのさらに上位の Application (APL) レイヤは Application Support Sub-layer (APS) によってイベントハンドリングなどが行われ、複数のアプリケーションが一つのノードで稼働できる。また、NWK Layer

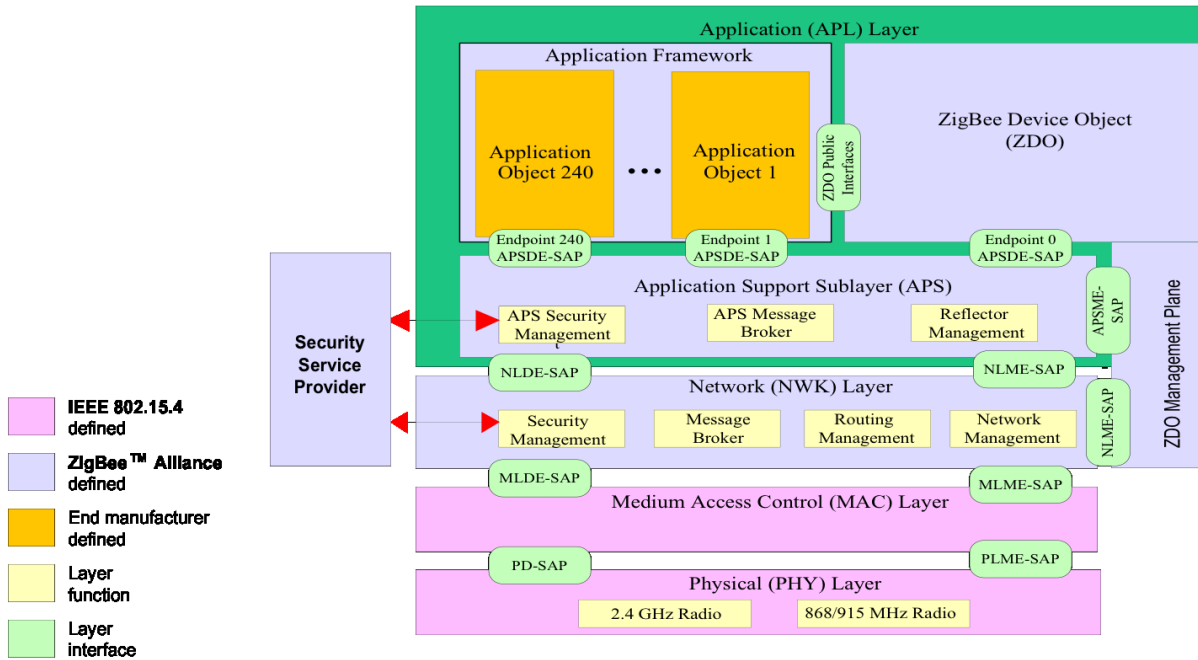


図 2.2: ZigBee stack

以上の各レイヤの操作をアプリケーションとして抽象化するための ZigBee Device Object (ZDO), 及び暗号化などのセキュリティを提供する Security Service Provider が存在する。[6, p.9] からスタックの概要を引用し図 2.2 に示す。

2.1.3 ZigBee ネットワーク

ZigBee ネットワークは IEEE802.15.4 同じく PAN といい、以下の 3 種のノードで構成される。

コーディネータ

PAN の主制御デバイスで、ネットワーク構築を担うフル機能デバイス。ルーティングをすると同時に、デバイスの PAN への接続管理を行う。

ルータ

マルチホップネットワークを形成し、データ (フレーム) の中継を行う。

エンドデバイス

機能の制限されたデバイスで、ルータとコーディネータに依存して通信を行う。

また、ZigBee ネットワークレイヤはスター、ツリー、メッシュの各トポロジをサポートする。図 2.3 にツリートポロジを用いた PAN の例を示す。

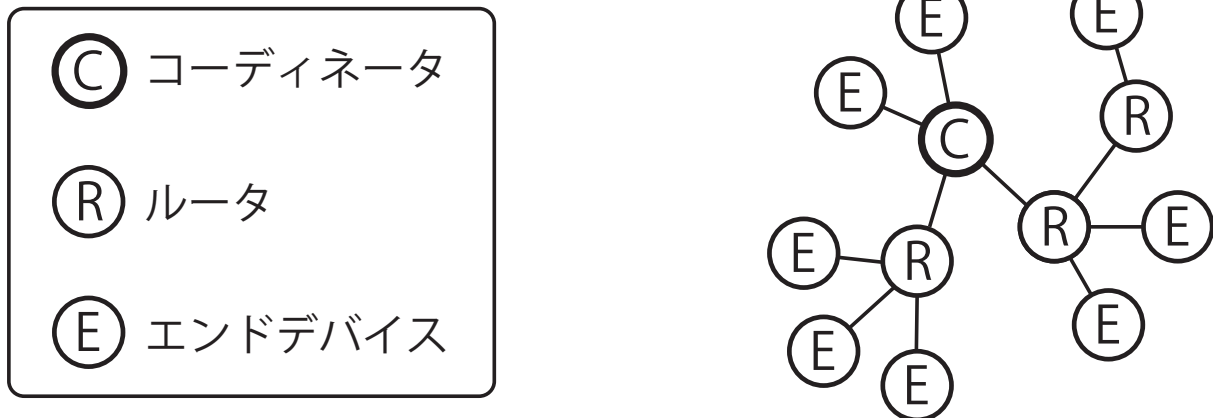


図 2.3: ZigBee ノードの種類

ZigBee は、アクセスの方式として CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) を採用しており、隣接ノードが通信をしている場合はフレームの送信を見送る。そのため、通信ノードの増加によりフレーム送信の機会は減少する。

2.1.4 ZigBee ルーティング

ZigBee (Stack Profile 0x01) でのツリートポロジにおけるルーティングは、NWK アドレスの空間を分割しつつ、ルーティング情報をアドレスに含めることによって行われる。ZigBee PAN にはアドレス空間の分割を行い、結果的にツリートポロジの制限をするパラメータが存在する。

Max Depth D

コーディネータから経由できるノード数 Depth の最大数。すなわち、コーディネータから最も深いノードまでのホップ数。

Max Children C

各ルータに接続できるノードの最大数。

Max Routers R

各ルータに接続できるルータの最大数。

Max End Devices E

各ルータからに接続できるエンドデバイスの最大数。Max Children と Max Routers のパラメータから自明に導くことができる。 $E = C - R$

ノードは自身の識別子として NWK アドレスを 1 つ使用するが、ルータの場合は親ノードからアドレスを付与される際、自身に予期される下流ノードのアドレスの最大数を同時に予約する。そのため、ルータは NWK アドレスのみで、フレーム宛先のノードが自身

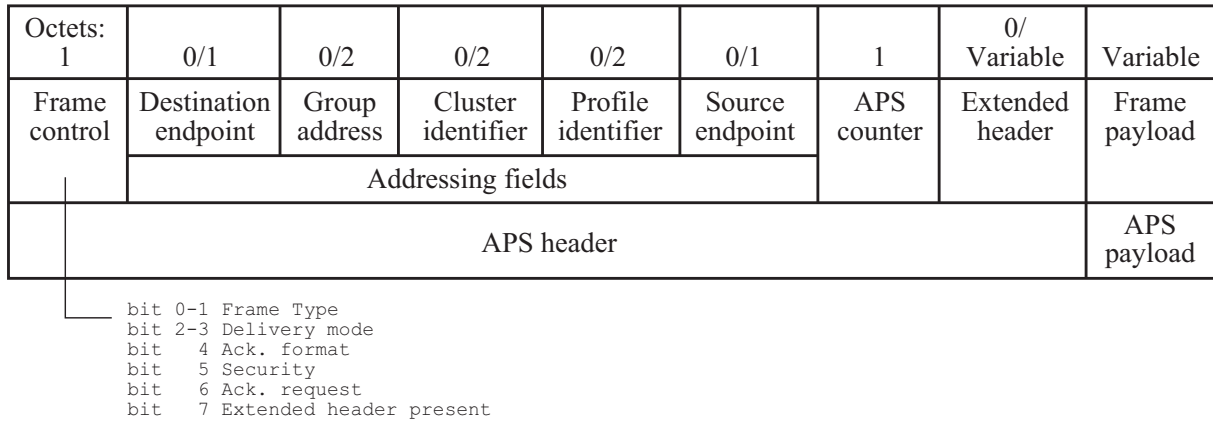


図 2.4: ZigBee APS フレームフォーマット

の上流か下流かを判別できる。Depth d のルータが Depth $d+1$ のノードに割り当てるアドレス数を C_{skip} と呼ぶ。Depth n における C_{skip} S_n は次のように表現できる。

$$S_D = 0$$

$$S_n = (S_{n-1})R + E$$

ZigBee は通信メディアが無線のデバイスである。そのためツリールーティングにおいて、自分宛でないフレームを受信したルータは宛先アドレスが自己の C_{skip} の範囲内かどうかのみでルーティングを行うか判断できる。そのため、ZigBee PAN に存在し得る最大ノード数 N は MAC ショートアドレス数の 65,535 にはならず、次の式で求められる。

$$N = 1 + S_0R + E$$

2.1.5 ZigBee フレーム

ZigBee では通信の信頼性向上のために Acknowledgement (Ack) を利用した再送制御が用意されている。ZigBee で使用できる Ack は MAC レイヤの Ack と APS レイヤの Ack がある。MAC レイヤの Ack は MAC フレーム (図 2.1) 中の Frame Control フィールドの内の Ack Request bit を立てることによって使用できる。一方、APS レイヤの Ack は APS フレーム (図 2.4) 中の Frame Control フィールドの内の Ack Request bit を立てることによって使用できる。MAC レイヤの Ack が直接通信をしたノードから返信されるのに対し、APS レイヤの Ack はネットワークレイヤの宛先 (直接通信の宛先でも、マルチホップする宛先でも) から返信される。Ack Request が有効なフレームを送信したノードは、宛先ノードからの Ack フレームを受信するまで、もしくは Ack フレームの待受時間が経つまで、フレームのデータを破棄せずに保持する。

2.1.6 ZigBee マルチキャスト

ZigBee PAN ではネットワークレイヤでマルチキャストが規定されており，利用することができる．マルチキャストは識別子として 16bit マルチキャストグループ ID を用いる．ひとつのマルチキャストグループはノードの一集団であり，そのノードは全て同じマルチキャストグループ ID で登録されていて，MaxNonMemberRadius として知られる所定の範囲を超えないホップ間だけ物理的に離れている．マルチキャストメッセージは特定の宛先グループに送信され，そのグループの全てのメンバに受信される．

マルチキャストフレームは，宛先マルチキャストグループのメンバと，メンバ以外の両方によりネットワークに伝達される．パケットは，パケットのモードフラグに従い次のホップへの中継方法を決定する．メッセージがグループ内のメンバにより作成された場合はメンバモードと判断され，ブロードキャストによって中継される．一方，メッセージがグループの非メンバにより作成された場合には，非メンバモードと判断されいずれかのグループメンバへのユニキャストにより中継される．一旦非メンバモードメッセージが宛先グループのいずれかのメンバに到達すると，すぐにメンバモード型中継に変換され，次に中継するのが誰であってもパケットの持続する間はメンバモードが維持される．

2.2 本章のまとめ

本章では，本研究で使用するワイヤレスセンサネットワーク，ZigBee についての概要を述べた．

第3章 ZigBee PAN の通信性能評価

本章では、センサネットワークを構成する ZigBee の通信性能評価について述べる。ZigBee では PAN におけるマルチホップ通信の信頼性向上のために 2.1.5 節で述べた APS Ack が用意されている。PAN が含む通信を行うノードの数とトポロジーが変わった場合に、APS Ack を使用する場合と使用しない場合で通信性能がどう変動するかを実験により測定、評価した。以後、単純に "Ack" という単語を使用する場合は APS Ack を指す。

3.1 評価目的

まず ZigBee の一対一、シングルホップでの通信を計測し、この結果から ZigBee の最大通信性能を調べる。次に一対多、マルチホップでのユニキャスト通信を測定し、一対一、シングルホップでの測定結果と比較する。これらの計測により、ZigBee PAN の通信性能が通信ノード数、ホップ数がから受ける影響を評価する。

3.2 計測項目

評価のために以下の 2 つの計測項目を設定した。

通信速度

PAN におけるノード間の通信速度。通信データの容量には MAC フレームヘッダを含め、MAC レイヤの速度を計測する。ここで指す通信速度は送信ノードひとつあたりの通信速度であり、PAN 全体の通信速度ではない。

パケットロス率

Ack 不使用時の計測で受信ノードに到達せず失われた、もしくは受信されたパケットの内その一部が誤っていたため破棄されたパケットの数が、送信された全てのパケットの数に対して占める割合。

3.3 評価実験

実際の速度を調べるため、センサデバイスに計測用のプログラムを実装し計測を実施した。

3.3. 評価実験

3.3.1 評価環境

ZigBee システムは Texas Instruments 社の製品を使用した。また、PAN の通信測定、監視には Daintree Networks 社の製品を使用した。図 3.1 にこれらの機器の外観を示す。

CC2530 ZigBee SoC

CC2530 は、Texas Instruments 社の ZigBee SoC (System-on-Chip) 製品である。無線デバイスからアプリケーションまでがワンチップで実装されており、またソフトウェアは in-circuit で書き換え可能である。また、スタックは後述の Zstack がソースコードを含めて公開されており、開発が容易である。本実験ではこの SoC を使用した同社の評価ボード CC2530EM、及びそのインタフェースボードである SmartRF05EB、電池で稼働する開発ボード SmartRF05BB を使用した。

ZStack ZigBee スタック

ZStack は Texas Instruments 社による ZigBee スタックである。MAC レイヤのローレベル部分など一部のデバイス依存の部分を除き、C 言語で記述されており、またソースコードが入手できる。本実験ではこのうち ZigBee Stack Profile 0x01 に適合し、CC2530 で稼働する Ver. 1.4.0 を使用した。統合開発環境としては IAR 社の Embedded Workbench MCS-51 7.51A を使用した。

Sensor Network Analyzer

Sensor Network Analyzer (SNA) は Daintree Networks 社による製品である。ZigBee の Air パケットをキャプチャ、プロトコルデコードし、表示するアプリケーションである。本実験では SNA Release 3.2 を使用した。デバイスは 2400E Sensor Network Adaptor 2.4GHz を使用した。

3.3.2 実験の概要

受信ノードをコーディネータ、送信ノードをエンドデバイスとし、Ack を使用時、不使用時それぞれでの通信速度、パケットロス率を測定した。各測定は表 3.1 に示すように、送信ノードの数 n を 1 個から 5 個、ホップの深度 D を 1 と 2 としたツリートポロジネットワークで実施した。

また、送信ノードが送信するパケットフレームは APL ペイロードが 99bytes、MAC フレーム全体で 126bytes とした。

Ack 使用時の通信では、送信ノードが受信ノードから返信された Ack パケットを受信した時点で通信の成功とみなし、そのパケットの数を計測した。このため、本実験における Ack 使用時のパケットロス率は 0 パーセントとなる。Ack 不使用時は、送信ノードが送信したパケットの数と受信ノードが受信できたパケットの数を計測した。各計測では約 10000 パケットずつ通信を行った。

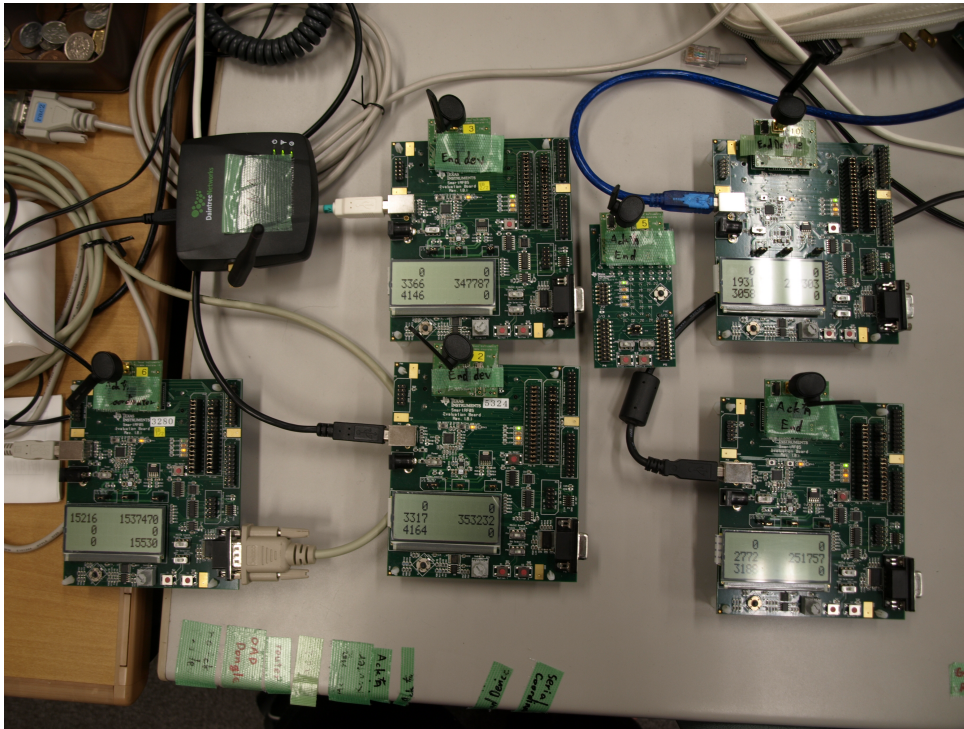


図 3.1: 機材写真 . SNA , cc2530EB , cc2530BB , cc2530EM

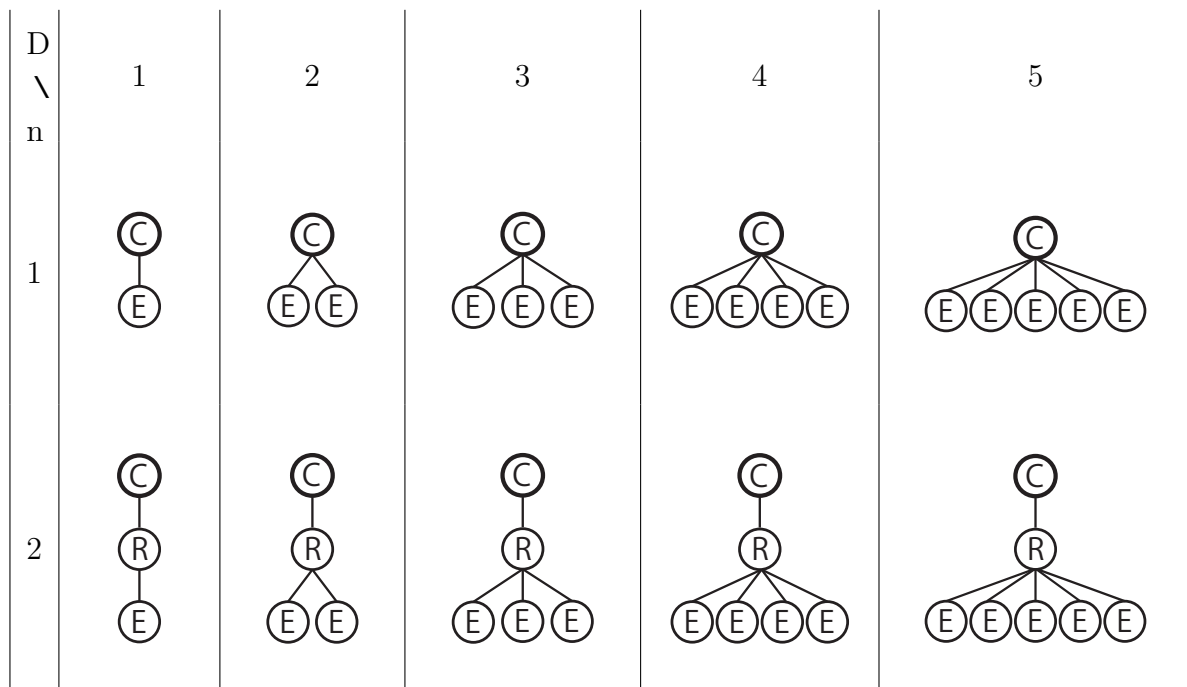


表 3.1: 実験のネットワーク構成

3.3. 評価実験

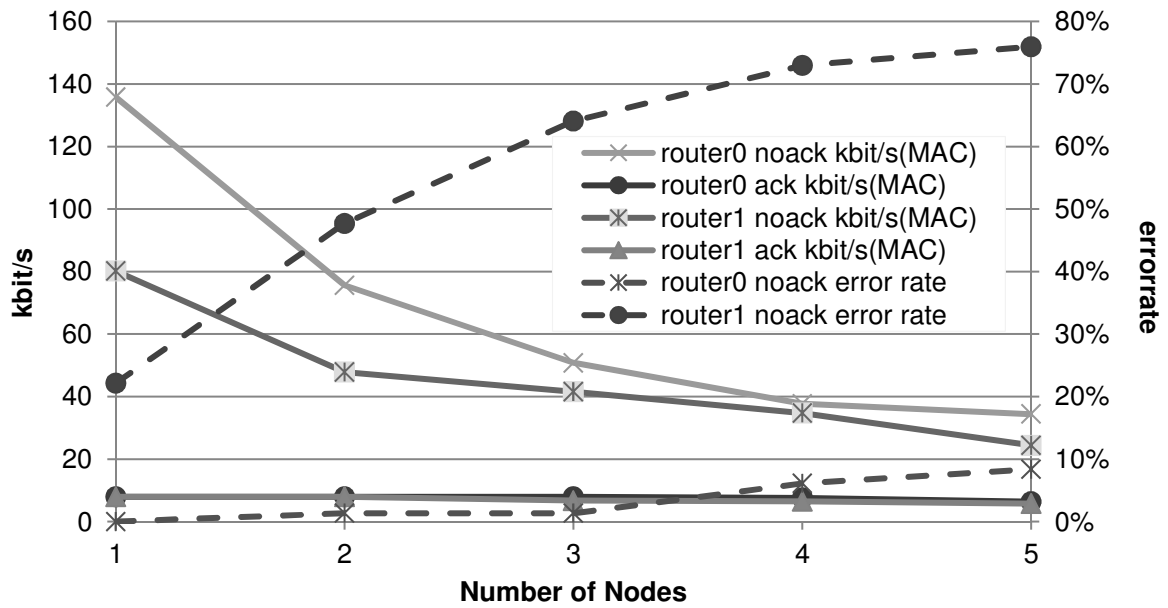


図 3.2: ZigBee の通信速度とエラー率

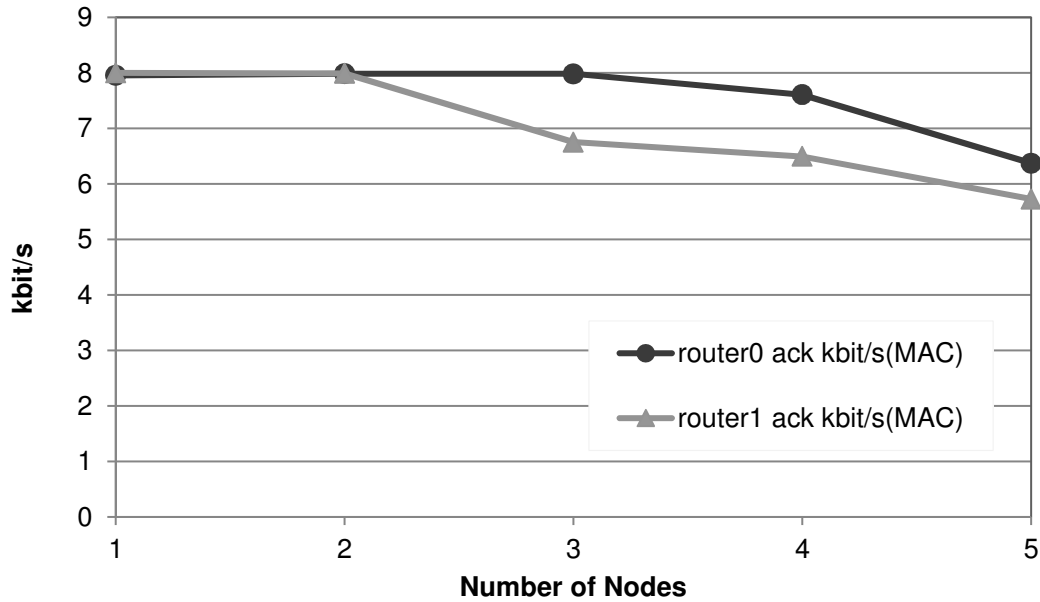


図 3.3: ZigBee の Ack を使用した通信速度とエラー率

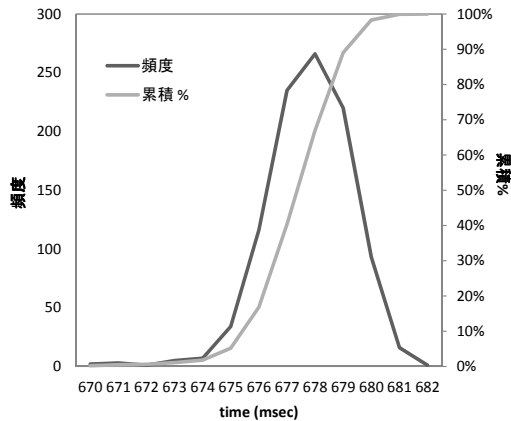


図 3.4: ノード数 1 の場合の Ack 間隔

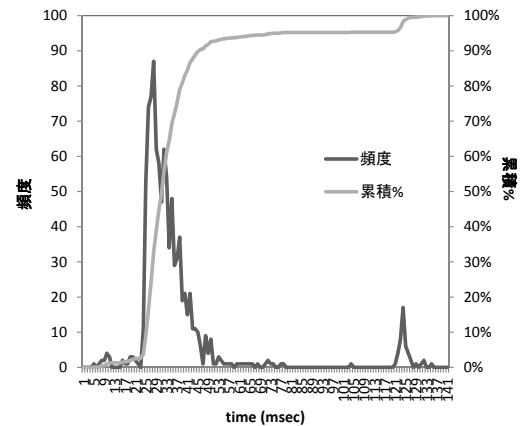


図 3.5: ノード数 5 の場合の Ack 間隔

3.3.3 実験の結果と考察

実験結果を通信速度とパケットロス率について考察する．図 3.2 は実験の結果について，通信速度とパケットロス率についてまとめたものである．図 3.3 は図 3.2 の Ack 使用時の部分を拡大したものである．

まず一対一，ホップ数 1 の場合に着目する．通信速度については，Ack 使用時の通信速度は約 8kbps であり，Ack 不使用時の通信速度は約 135kbps である．パケットロス率については Ack を一対一，1 ホップの場合は Ack 使用時でもパケットロス率はほぼ発生せず，ほぼ 0 パーセントであった．この結果は Ack 不使用時の最高通信速度は Ack 使用時の最高通信速度の約 17 倍であることを示す．

次にノード数，ホップ数と通信速度の関係を考える． D が 1 の場合共に n が増えた場合は Ack を使用する場合，しない場合共に通信速度が低下した． D が 1 の場合の送信ノード数が 1 から 5 に増加するのに伴い，通信速度が Ack 使用時は約 8.0kbps から約 6.3kbps に，Ack 不使用時は約 135kbps から 34kbps へと低下した．一方 D が 2 の場合では，Ack 使用時は約 8.0kbps から約 5.7kbps に，Ack 不使用時は約 80kbps から 24kbps へと低下した．

Ack 使用時では D が 1 で n が 1 から 3 の場合と， D が 2 で n が 1 と 2 の場合の通信速度は，全ての場合においてほぼ 8kbps であった．この結果から Ack 使用時には通信速度のボトルネックがエンドデバイスがコーディネータからの Ack 返信を待機時間にあると予測した．この予測を検証するために Ack 使用時， n が 1 と 5 の場合について，受信ノードが一つのパケットに Ack を返してから次のパケットに Ack を返すまでの時間を分析した．分析のため D が 2， n が 1 の場合と 5 の場合それぞれで SNA (Sensor Network Analyzer) により連続した 1001 個のパケットをキャプチャした．SNA が各パケットをキャプチャした時刻から，次のパケットをキャプチャした時刻までの間隔をヒストグラムにまとめ，図 3.4，3.5 に示す．

計測結果では受信ノードが Ack を返す間隔は n が 1 の時は平均約 34msec， n が 5 の時は平均約 678msec だった．これらの平均値は図 3.4，3.5 における累積確率の分布からも有効と判断できる．また，図から受信ノードが Ack を返す間隔は， n の増加に伴って短く

3.3. 評価実験

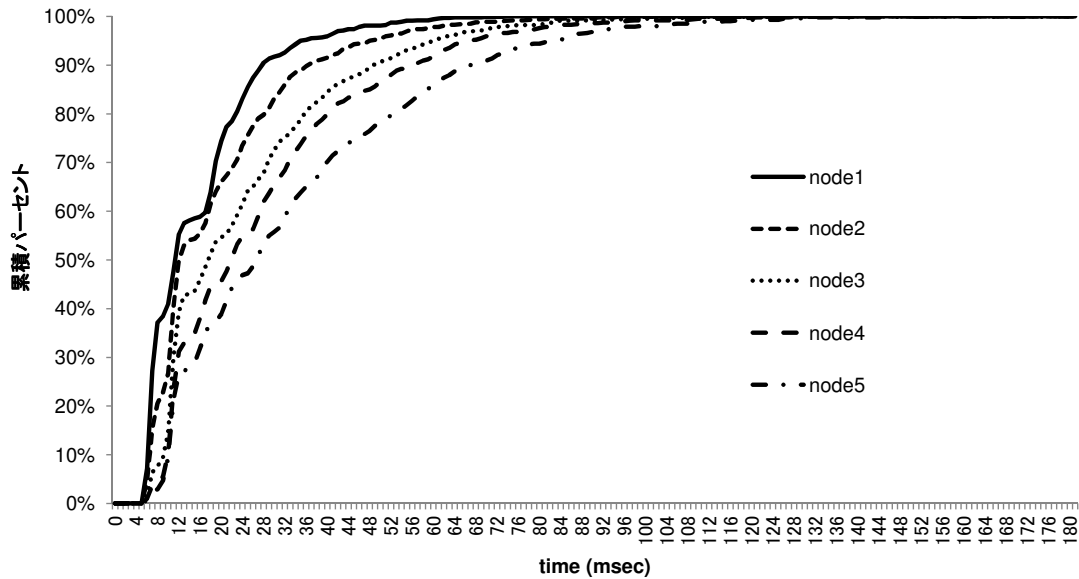


図 3.6: ルータによる転送の時間間隔の累積分布

なっていることが分かる．このように n を変化させた場合でも通信速度の大きな変化はみられないため，通信速度のボトルネックは送信ノードの Ack の待受時間であると判断できる．センサデバイスは記憶領域が小さいため，Ack が有効なフレームデータを多数保持する領域が十分に確保できない．そのため送信ノードは Ack の受信またはタイムアウトまで，次のパケットの生成，送信を見送らねばならず，実験結果のように通信の遅延を発生させる．

Ack 不使用時はノード数増加に伴う通信速度の低下が顕著だった．これはパケットロスの増加によるものと予測した．Ack 不使用時のエラー率は D が 1 の場合は n が 1 から 5 に増加するに従って 0, 0.1, 1.4, 6.1, 8.3 パーセントと増加し， D が 2 の場合は 22, 47, 64, 73, 75 パーセントと増加した． D が 1 の場合に比べて 2 の場合，つまりルータを介さない場合に比べて介する場合，パケットロス率がはより大きく上昇している．このことから Ack 不使用時の通信性能については，ルータがボトルネックになると予測した．

この予測を検証するために n が 1 と 5 の場合にルータがデータを転送する時間を測定した．Ack 不使用， D を 2， n を 1 から 5 に設定した PAN で通信を行い，ルータが送信ノードから受信ノードに転送した APL フレームパケットを連続で 1001 個ずつ SNA でキャプチャした．各パケットのキャプチャ時刻の間隔を，ルータが各パケットを転送してから次のパケットを転送するまでに要する時間としてキャプチャ結果を分析した．分析結果をまとめたヒストグラムを図 3.6 に示す．

キャプチャ結果ではルータの平均転送速度は n が 1 から 5 へ増加するに従って，順に約 15.8, 19.3, 24.4, 27.9, 33.5 msec と低下していった．また，ヒストグラム分析から送

信ノード数の増加に伴ってルータの転送速度が不安定になっていることが分かる．今回の実験環境ではルータは全ての送信ノードの親であり，受信ノードはルータが処理できたパケットのみを受信することとなる．つまり，送信ノードの増加によりルータが処理する必要のあるパケットが増加し，ルータの処理性能を超過した分が PAN の性能低下に繋がる．

Ack を使用する場合は，ルータは全ての送信ノードからの送信パケットと，受信ノードからの Ack パケットを全て処理する必要がある．ルータの性能評価の結果は Ack 使用時も n の増加に伴い，Ack 不使用時と同じくルータがボトルネックになることも示唆している．これらの値は使用したデバイスの性能限界であると見なすことができる．

3.4 本章のまとめ

本章では ZigBee PAN の通信性能を評価するために行った測定の結果を示し，その分析を述べた．結果から一対一の通信では Ack 不使用時の通信速度は約 135kbps であり，Ack 使用時の通信速度約 8kbps の約 17 倍の速度が出ることが分かった．また，Ack 使用時の通信速度のボトルネックは送信ノードが受信ノードからの Ack 待機時間であり，Ack 不使用時のマルチホップ通信におけるボトルネックはルータの性能であることがわかった．

第4章 効率的なデータ配送

本章では3章で示した，評価実験から判明した ZigBee PAN の通信性能を改善する方法を提示する．

4.1 提案手法の目的

センサネットワークにおいてファームウェア配送などの送信データが大きく，同じデータを複数のノードへ配送する場合には，コーディネータなどのネットワークの端，ツリー構造では根に当たる高性能なノードが配送元となり一対多の通信が予測される．3章で示した通り，センサネットワークでは通信ノードが増加することによって通信の速度，信頼性が低下する．

このような場面ではマルチキャストの利用が有効であり，ZigBee プロトコルスイートでは，2.1.6 節で述べたように，マルチキャストがネットワークレイヤで実装されている．マルチキャストはネットワーク全体の通信量を低減させる有効な手段であるが，Ack が使用できず，通信の信頼性は Ack を用いたユニキャストよりも低くなる．ファームウェアの配送などのシーンでは通信の信頼性も重視される．

そこで，本研究ではマルチキャストが難とする通信の信頼性を補う案としてパケット符号化の利用を提示する．IP ネットワークでのマルチキャスト通信ではパケット符号化を用いた信頼性の向上が有効である [7]．よって，センサネットワークもパケット符号化によりマルチキャスト時の信頼性向上は可能であると予測できる．提案手法は図 4.1 に示すように，センサネットワークにおける通信の速度，信頼性をパケット符号化を利用し目的に即した品質にすることを目的とする．

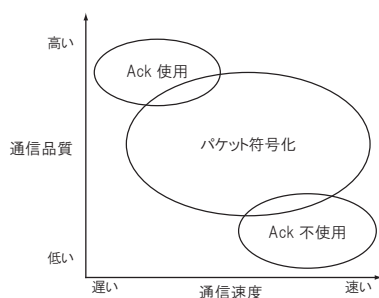


図 4.1: 通信方法の比較

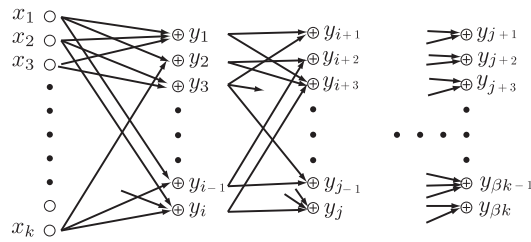


図 4.2: Tornado 符号のレイヤ構造

4.2 パケット符号化

パケット符号化は送りたいソースデータから冗長パケットを生成し、パケットが一部失われても冗長パケットからソースデータの復元を可能とすることを目的とする。

冗長パケットはソースデータを分割し、分割したデータ同士の排他的論理和による生成を基本とする。最も単純な例を述べる。送信側はソースデータを K_1, K_2 の 2 つのデータパケットに分割した場合、冗長パケットとして $L = K_1 \oplus K_2$ を生成し、データパケットとと共に送る。ここで、 \oplus はビットごとの排他的論理和を表す。この場合、受信側は K_1, K_2, L の 3 つのパケットのうち 1 つ、受信できなかったとしても、ソースデータを得られる。受信できなかったパケットが L の場合はもちろん、 K_1, K_2 のどちらかが受信できなかった場合でも、それぞれ $K_1 = K_2 \oplus L$, $K_2 = K_1 \oplus L$ と計算を行うことにより、失われたパケットを復元してソースデータを得られる。

4.3 マルチキャストにおけるパケット符号化

文献によるとマルチキャストにおけるパケット符号化には Tornado 符号の利用が有効である [7]。

4.3.1 Tornado 符号

Tornado 符号の概要を述べる。Tornado 符号における送信パケットは k 個のソースデータパケットと $k\beta$ 個の冗長パケット、合わせて $n = k + \beta k$ 個のパケットから構成され、符号化率は k/n で表される。ここで i 番目のソースデータパケットを x_i , j 番目の冗長パケットを y_j とする。Tornado 符号では、冗長パケットは $y_3 = x_4 \oplus x_4 \oplus x_7$ のような形を持つ線形方程式で表される。さらに Tornado 符号では $y_{53} = y_3 + y_7 + y_{13}$ のように、冗長パケットを元に新たな冗長パケットを生成する構成も可能である。つまり、複数の冗長パケットのレイヤを作成でき、各レイヤのパケットは前のレイヤのパケットに依存する。パケットのレイヤ構造は図 4.2 のように表される。また、各レイヤ間のノードの関係は図 4.3 に示すような二部グラフで表される。これらの図における各レイヤ間のグラフでは、左側のノードがソースデータパケット、右側のノードが冗長パケットとしている。

4.4. センサネットワークにおけるパケット符号化

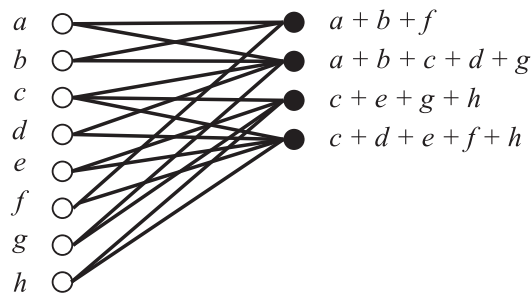


図 4.3: Tornado 符号の二部グラフ

Tornado 符号の符号化では任意のソースデータパケットをいくつか選び、その排他的論理和を冗長パケットとする。この操作では、パケットの次数 (degree) が重要な意味を持つ。ここで次数は、各ソースデータパケットがいくつの冗長パケットの生成に関わっているか、及び各冗長パケットがいくつのソースデータパケットから生成されたか、つまり図 4.2 においては各ノードの持つ線 (枝) の数のことを示す。Tornado 符号は演算に排他的論理和を用いる。そのため、符号化及び復号に要する時間に大きく影響を与える総演算回数は次数に比例する。Tornado 符号はグラフ中の冗長パケットを 2 つの部分に分け、一方はソースデータパケットの次数を heavy tail distribution により算出する部分とし、もう一方は定次数を割り当てる部分とする。heavy tail distribution はソースデータパケットの次数が i となる確率 $P(i)$ が 4.1 式で与えられる分布である。ここで、 D は次数の上限を定めるパラメータである。

$$\lambda(i) = \frac{D+1}{Di(i-1)} \quad (4.1)$$

k 個のソースパケットから heavy tail distribution を用いて l 個の冗長パケットを作り、提示数を割り当てて m 個の冗長パケットを作り、冗長パケットの数は冒頭で述べた $n = l + m$ 個になる。符号を構成するには、符号化率や次数の分布関数を設定する必要がある。Tornado 符号では平均次数を 20 程度に設定するのが最も有効である [7][8]。

4.4 センサネットワークにおけるパケット符号化

RS 符号や Tornado 符号などの、符号理論は基本的に符号、復号を実行するデバイスとして PC や専用 LSI が想定されている。本研究はセンサネットワークでパケット符号化を行う。センサネットワーク 2.1 節で述べた特徴を持っており、またセンサデバイスは、PC や LSI 等に比べて計算資源、記憶容量が少ない。センサデバイスの性能でパケット符号化の手法に重要な影響を与える要因が、大きく分けて 2 つ存在する。

計算性能

符号、復号は論理演算を利用して行うため計算資源の影響が大きい。センサデバイスは計算資源に乏しく、複雑な計算を用いる符号理論は使用できない。

記憶容量

符号，復号のためにデバイスはソースデータを一時的に保持しておく必要があるが，センサデバイスは記憶容量が小さく，保持できるデータパケットの数が制限される．

センサネットワークではセンサデバイスの機能不足による制約のため，複雑な計算による符号，復号，符号化率導出や，大量のパケットを用いた符号化が困難である．そのため，本研究では符号化率を事前に定め，ソースデータパケット数の少ない計算が簡易な符号を利用した．

4.5 本章のまとめ

本章ではセンサネットワークで通信速度と通信信頼性を求める通信に，パケット符号化を用いたマルチキャスト通信の利用を提示し，センサネットワークに適切な符号化についての考察を述べた．

第5章 実装

本章では提案手法を評価するための実装について述べる。

提案手法では、符号化によって通信の改善が可能であることを示すため単純な符号を用いた実装を行った。提案手法の実装には 3.3.1 節にて示した、ZigBee PAN の評価の時と同じ環境を用いた。エンドデバイスを送信ノード、コーディネータを受信ノードとし、エンドデバイスが送信するパケットフレームも 3.3.1 節での ZigBee の評価と同じく、エンドデバイスが送信するパケットフレームは MAC ペイロードが 99bytes、MAC フレーム全体で 126bytes とした。

5.1 パケット符号化の実装

本実装で用いる CC2530EM の RAM サイズは 8kbytes であり、パケット符号化に使用できる領域は必ず 8kbytes 以下となる。RAM は他のプロセスと併用するため実際に使用可能な RAM 領域は 8kbytes よりも少なくなり、送信ノードは冗長パケット生成のためにストックするソースパケット数を、受信ノードは復号のためにストックするパケット数をこの領域の大きさによって制限される。

本実装では、データパケット 2 つに対して 1 つの冗長パケットを生成する構成の符号を用いた。つまり符号化率は $2/3$ となる。

以下に送信ノードと受信ノードの動作手順を述べる。

5.1.1 送信ノード

送信ノードはデータパケットと冗長パケットを生成して送信する。送信ノードのフローチャートを図 5.1 に示し、その詳細な流れを述べる。送信ノードは通信開始のフラグが立つと、初期動作としてパケットカウント `pkt_cnt` と符号化ブロックのカウント `code_cnt` に初期値を入れる。次に `pkt_cnt` をデータパケットの最大数と比較し、小さい場合はソースパケットを生成し生成したパケットを RAM に置き、最大数以上の場合はバッファに十分にデータパケットが格納されていると判断して、バッファの中から適切なデータパケットを複数選択してそれらを排他的論理和することで、冗長パケットを生成する。これらのパケットは先頭にシーケンス番号としての `pkt_cnt` と符号化ブロック内での番号としての `code_cnt` を含めて生成される。生成されたパケットは送信フェイズに入り、送信が成功すると `pkt_cnt` と `code_cnt` がインクリメントされる。送信パケット数はここでカウン

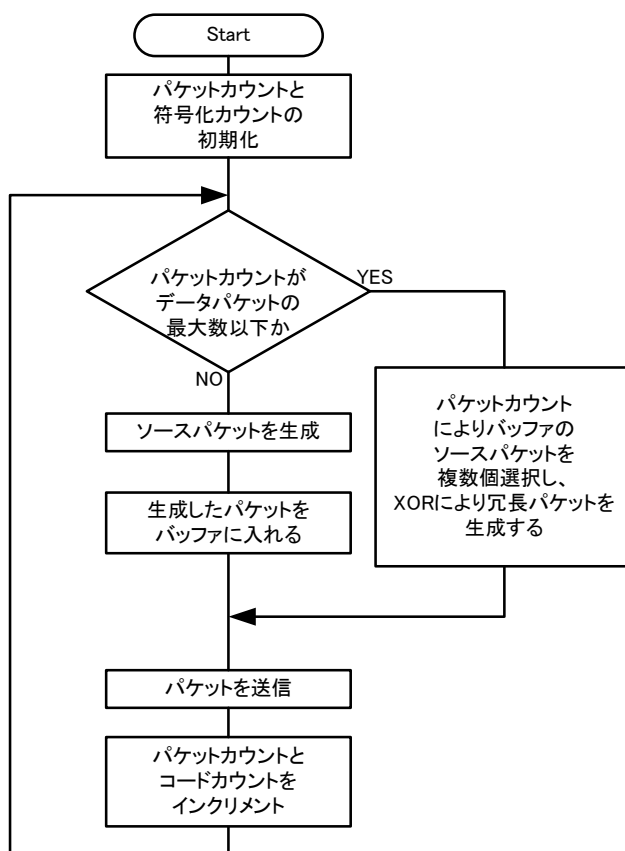


図 5.1: 送信ノードのフローチャート

トされる．code_cnt はループする前に符号ブロックに含まれる総パケット数と比較され，総パケット数以上の時は初期値が入れられる．

この手順より，パケットの送信順番は $x_1, x_2, y_1 = x_1 \oplus x_2$ という順になる．

5.1.2 受信ノード

受信ノードは受信パケットをストックし，パケットロスが発生した場合に可能であれば復号する．受信パケットは復号作業の前にパケットエラーが無いかのチェックを行っている．図 5.2 に受信ノードにおける復号のフローチャートを示す．

図 5.2 に従ったプログラムを受信ノードに実装したところ，パケットロス率がほとんど改善されなかった．原因を調査するため，SmartRF05EB ボードのシリアル通信コネクタから受信データ処理順に出力する実装を追加し，パケットの調査を行った．その結果，受信ノードが受信パケットを処理する順番は送信ノードが送信した順番とは異なることが判明した．実験環境においては番号順に送信されたパケットが，図 5.3 の上列に示す順番でパケットを処理されていた．

5.2. 本章のまとめ

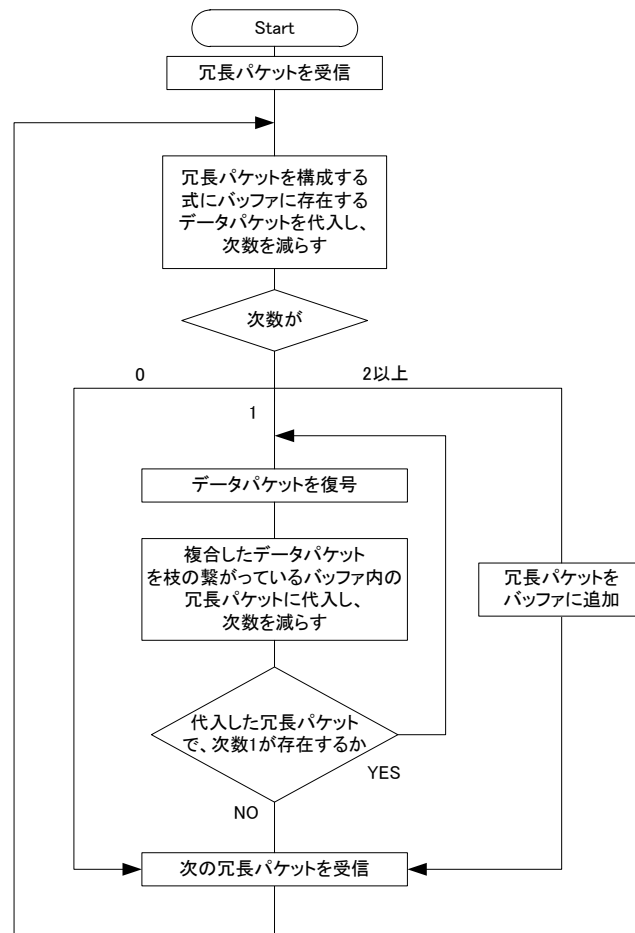


図 5.2: 受信ノードのフローチャート

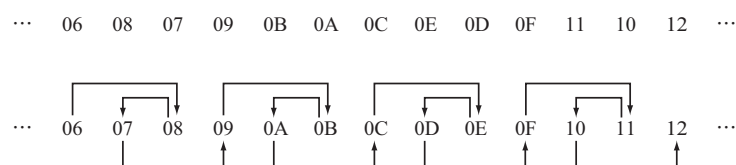


図 5.3: パケットの処理順

このため、上述の手順は本実装環境では適用できないことが判明した。そのため、受信パケットがソースパケットか、冗長パケットかによる処理の分岐を追加し、図 5.2 に示すフローチャートに従いパケットの復号を行った。

5.2 本章のまとめ

本章ではセンサデバイスへ実装するパケット符号化プログラムの概要を示した。

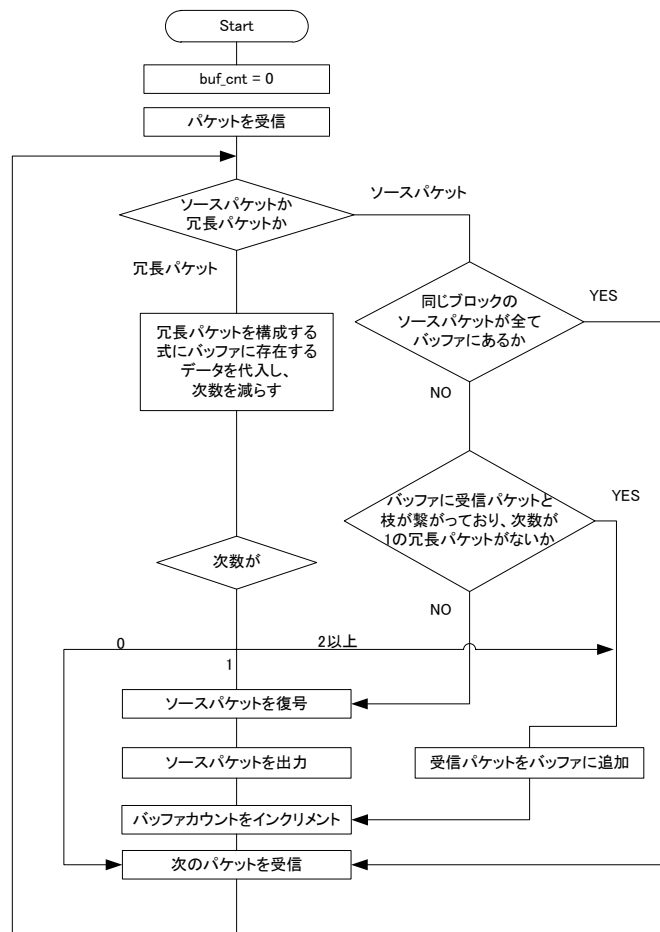


図 5.4: 改善後の受信ノードのフローチャート

第6章 評価

本章では提案手法であるパケット符号化を用いた ZigBee PAN の通信性能評価を行う。実機へ 5 章で述べた提案手法の実装をし計測を行い、同じ環境で Ack 使用時、不使用時の計測をする。各計測の結果を比較することでパケット符号化の効果を示す。実験環境は 3 章で述べた評価で用いたものと同じ環境を使用した。

6.1 評価方針

計測項目は 3.2 節にて示した、ZigBee の通信性能評価実験と同じ通信速度、パケットロス率の 2 点を用いる。

提案手法はマルチキャストを使用することにより、複数ノードに対して同じのパケットを送信する環境を想定しているため、ホップ数の増加のみに着目して計測を行った。それぞれの通信手法を使用してホップ数の深度 D を 1 から 3 まで変えて計測を行った。ネットワークはライン構造であり、ラインの両端に配置するノードが送信ノードであるコーディネータと、受信ノードであるエンドデバイスであり、それ以外のノードはルータである。

6.2 結果と考察

計測結果を通信速度とパケットロス率についてまとめ、図 6.1 に示す。

まず通信速度について考察する。全ての通信方法でホップ数の増加に伴い通信速度が落ちている。Ack 不使用時、パケット符号使用時、Ack 不使用時の通信速度はそれぞれ、ホップ数が 1 の場合に 約 135kbps, 44kbps, 8kbps であり、ホップ数が 5 の場合に 約 40kbps, 15kbps, 8kbps であった。パケット符号使用時の通信速度は Ack 使用時の通信速度よりも速く、Ack 不使用時の通信速度よりも遅かった。また、ホップ数による速度の減衰は Ack 不使用時よりも緩やかだった。次にパケットロス率について考察する。ホップ数の増加に伴い Ack 使用時、パケット符号使用時共にパケットロス率は上昇しているが、パケット符号使用時は Ack 使用時よりもパケットロス率が低かった。

これらの結果はパケット符号によって、失われたパケットの一部が復元できたことを示唆している。

ここで 1 ホップ時の Ack 不使用時と符号使用時の通信速度に注目する。今回の符号化率は $2/3$ であり、符号使用時の通信における前パケットに占めるソースデータパケットの割合がこの率である。つまり、単純に計算すると符号使用時の通信速度は Ack 不使用時

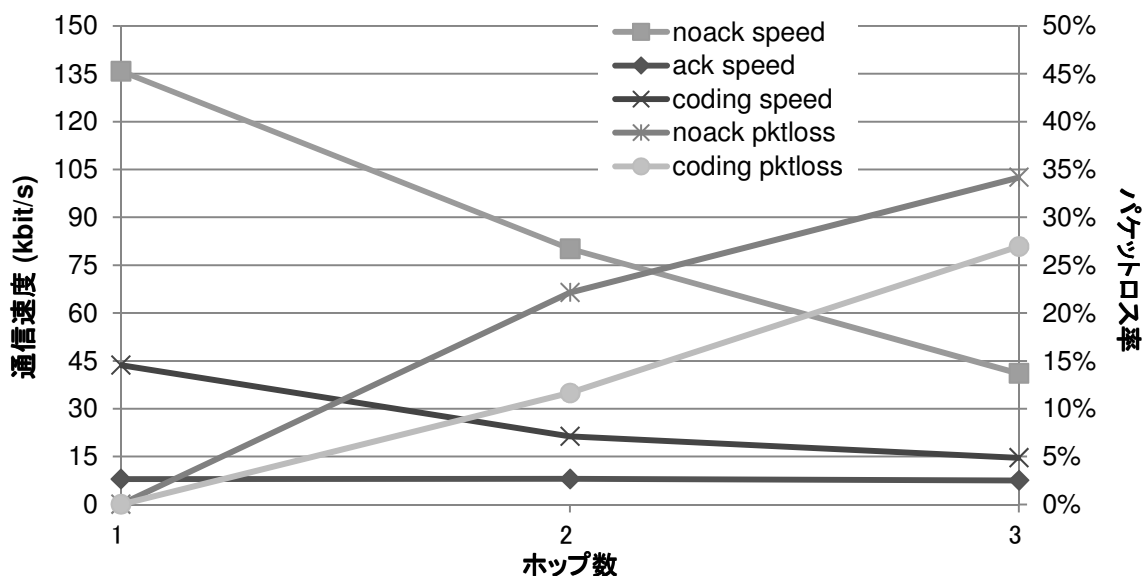


図 6.1: 各通信方法の通信速度とパケットロス率

の速度の $2/3$ 程度になるはずである。しかし、計測結果では符号使用時は Ack 不使用時 $1/3$ の速度しか出ていない。

3章での測定と今回の測定では最大通信速度を得るために、送信ノードはパケットを連続で送信するように設定していた。そのため、受信ノードもしくはルータのウィンドウサイズを超過してパケットが送信され、超過したパケットが全て失われたと予測した。予測を検証するために送信ノードのインターバルを追加し、再度測定を行った。インターバルの間隔は 6msec とした。測定結果を図 6.2 に示す。

まず、インターバルの追加時と非追加時の計測結果の比較により、インターバル追加による通信性能への影響を見る。インターバルの追加により Ack 不使用時の最大通信速度は 135kbps から 57kbps へ、符号使用時の最大通信速度は 47kbps から 35kbps へと減少した。Ack 使用時には通信速度に大きい変化が見られなかった。パケットロス率は Ack 不使用時、符号使用時共に大きく減少した。この比較結果はインターバル追加時の測定結果がデバイスのウィンドウサイズに収まった通信をしていることを示唆する。

次に、インターバル追加時の測定結果を考察し、パケット符号化の効果を考察する。

2ホップと3ホップの場合の Ack 不使用時と符号使用時のパケットロス率に注目する。パケットロスについては符号使用時はホップ数が増加してもパケットロスが発生しなかったのに対し、Ack 不使用時はパケットロスが2ホップ時に 0.14%、3ホップ時に 2.4% 発生した。この測定結果は、Ack 不使用時に見られたパケットロスをパケット符号の利用により、補填できたことを示唆する。また、転送に成功したデータ量と通信時間から算出される実質的な通信速度について Ack 不使用時と符号使用時で比較すると、1,2,3ホップの場合にそれぞれ 64%、65%、68% となり、3ホップ時には符号化率 $2/3$ を上回った。

6.3. 本章のまとめ

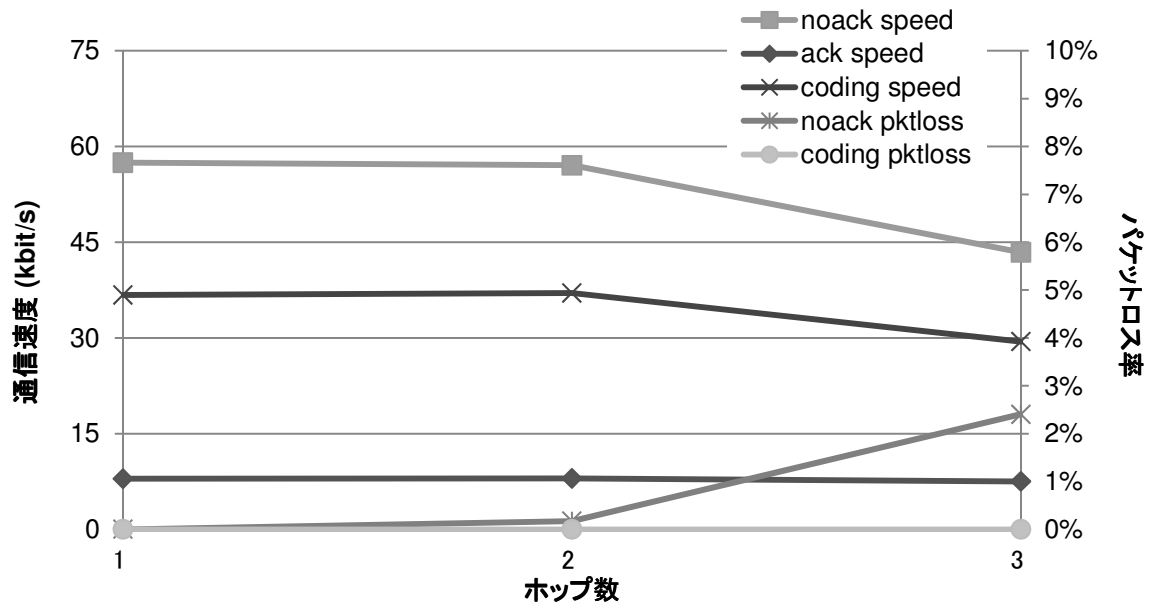


図 6.2: インターバル追加時の通信速度とパケットロス率

6.3 本章のまとめ

本章では、パケット符号を用いた通信の評価のために行った二つの実験についてまとめた。一つ目の実験結果からセンサネットワークにおける通信性能がセンサデバイスのウィンドウサイズに大きく影響されることが判明した。二つ目の実験結果からは ZigBee PAN においてパケット符号を使用することで Ack 使用時よりも高速かつ Ack 不使用時よりも信頼性の高い通信を効率的に実現できることが示された。また、本実験では符号化率を $2/3$ としたが、符号化率を変更することで通信の高速化や信頼性の向上が望める。

第7章 結論

7.1 本論文のまとめ

センサーネットワークでは、デジタルサイネージやホームセンサネットワークなどの遠隔地のノードに対し、ファームウェアの更新のように大きいデータを大量のノードに対して配送できることが望まれる。同じデータを複数のノードへ配送するにはマルチキャスト通信が有効であるが、マルチキャスト通信はパケットの到達確認を行わないため通信信頼性が低い。一方、誤りがある状況で確実に転送するのであれば、センサネットワークの通信プロトコルで再送制御を行うことが有効である。ただし再送制御を行う場合には、Ackを待つ時間によってスループットが劣化する。本論文はセンサネットワークがノード数、ホップ数の増加により通信性能が低減することを示し、改善案としてセンサネットワークに適したパケット符号化を用いた通信方式を提案し、ZigBee (IEEE 802.15.4) を用いた実装により、APS Ack を用いない約 60kbps の通信で 2 ホップ時に 0.14%、3 ホップ時に 2.4% の割合で発生するパケットロスを、符号化率 2/3 のパケット符号化を用いることによりにより全て復元でき、約 2/3 の通信速度で通信できることを示した。

7.2 今後の課題と展望

本節では、本研究の今後の課題と展望として以下の事項を挙げる。

パケット符号の改善

符号率を変えることによる通信速度とパケットロス率の変動を調査し、よりセンサネットワークに適切な符号化を示す。また、受信ノードが復号の成功率が低い場合には符号率を下げて冗長パケットを増やす要求を、成功率が高い場合には符号率を上げて冗長パケットを減らす要求を送信ノードに送り、送信ノードは受信ノードの要求に即して符号率を変化させる、というような機能を追加することで、センサネットワークの通信環境に応じて符号化率を変更し最適な通信を可能とする。

アプリケーションによる再送

パケット符号化は Ack 不使用時よりもデータロス率は低く抑えることができるが、Ack 使用時とは異なり通信が不完全に終わる確率は残る。そのため、アプリケーションによる欠落部分の補完と組み合わせて使うことが望ましい。例えば次のような手順のアプリケーションとの組み合わせられる。受信ノードは全てのデータ配信が終わった後にパケットロスしたデータ再送を要求する。送信ノードは再送要求に対し

7.2. 今後の課題と展望

て、複数のノードからのリクエストがあるデータを再びマルチキャストする。このようなアプリケーションの有効性を検討する。

マルチキャスト

実際にマルチキャスト通信で本提案手法を適用した場合の測定を行う。

IP ネットワークとの接続

遠隔地からセンサノードを管理のために 6LowPAN[9] や ZigBee PAN トンネリング [10] などと、本手法を組み合わせた通信の検討する。

参考文献

- [1] 総務省 情報通信国際戦略局 情報通信政策課. Ict ビジョン懇談会報告書, June 2009. 1.1
- [2] S. Shiori, Y. Takehiro, M. Keita, Y. Shigeru, H. Hisakazu, M. Jin, N. Osamu, and M. Jun. Medication management using home sensor network toward expanding home health care (proving test in home care). *Information Processing Society of Japan*, 28, 2010. 1.2
- [3] Y. Takehiro, S. Shiori, M. Keita, Shigeru Y., H. Hisakazu, M. Jin, N. Osamu, and M. Jun. Medication management using home sensor network toward expanding home health care (system development), ubiquitous computing system. *Information Processing Society of Japan*, 28, 10 2010. 1.2
- [4] ZigBee Alliance. Zigbee specification, r17, July 2008. 2
- [5] The Institute of Electrical and Inc. Electronics Engineers. Ieee standard for information technology telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks specific requirements part 15.4: Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low-rate wireless personal area networks (wpans), June 2006. 2
- [6] Drew Gislason. Zigbee technical overview, July 2008. http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop_download.asp?contentID=13710. 2.1.2
- [7] J. W. Byers, M. Luby, and M. Mitzenmacher. A digital fountain approach to asynchronous reliable multicast. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 20(8):1528–1540, 2002. 4.1, 4.3, 4.3.1
- [8] YAMATO Ryohei, UMEHARA Daisuke, MORIHIRO Yoshiteru, NOGUCHI Taku, and KAWAI Makoto. A decoding method for tornado-type codes utilizing error packets. *The transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. B*, 89(5):763–772, 2006-05-01. 4.3.1
- [9] Montenegro G, Kushalnagar N, Hui J, and Culler D. Transmission of ipv6 packets over ieee 802.15.4 networks (rfc 4944), September 2007. 7.2
- [10] 佐藤泰介. 広域センサーネットワークにおける実践的な移動ノードの管理. 2010. 7.2

謝辞

本論文の作成にあたり、御助言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，同学部准教授楠本博之博士，同学部専任講師重近範行博士，同学部専任講師 Rodney D. Van Meter III 博士，同学部准教授植原啓介博士，同学部教授武田圭史博士に感謝します。

研究に関する指導を多くいただきました，研究環境情報学部准教授 三次仁博士に深く，深く，深く，感謝いたします。

常にご指導いただいた政策メディア研究科特別専任講師 稲葉達也博士，羽田久一氏，同研究科特別研究助教 鈴木茂哉氏，中根雅文氏に深く，深く感謝いたします。

Auto-ID へ所属し慣れない中で様々なご指導を頂いた，パナソニックシステムネットワークス株式会社 徳増理氏，電気通信大学電気通信学部特任助教 川喜田佑介博士，慶應義塾大学メディアデザイン研究課 杉本健一氏，株式会社インターネットイニシアティブ 佐藤龍氏に感謝いたします。

Auto-ID における，ZigBee 家族の長兄である，株式会社インターネットイニシアティブ 佐藤泰介氏に感謝いたします。

卒業論文執筆で苦楽を共にした，富田千智氏，宮崎圭太氏，広石達也氏，山田真弘氏に感謝いたします。お疲れ様でした。

Auto-ID Lab. Japan において研究活動においてお世話になった株式会社日放電子 白石雅彦氏，ホロシェフ ロマン氏，株式会社ブロードバンドタワー 青木伸行氏，電機工業株式会社 松本伸史氏，Auto-ID Lab. Japan 研究員 金仙麗氏，株式会社 KDDI 神谷尚保氏，慶應義塾大学政策メディア研究科修士課程，鈴木詩織氏，江村圭吾氏，山口修平氏，同大学環境情報学部，能島良和氏，佐藤友紀氏，横石雄大氏，Doan Hoai Nam 氏，五十嵐祐貴氏，同大学総合政策学部 小澤みゆき氏に感謝いたします。

そして徳田・村井・楠本・中村・高汐・重近・バンミーター・植原・三次・中澤・武田 合同研究プロジェクトの諸氏皆々様に感謝致します。

以上を持って謝辞とさせていただきます。ありがとうございました。