

K-026

多機能コンセントを用いた 中規模センサネットワークの構築に関する研究 Construction of the Middle Scale Sensor Network using the Multifunctional Outlet

岡本 拓也[†]

Takuya Okamoto

笹間 俊彦[†]

Toshihiko Sasama

川村 尚生[†]

Takao Kawamura

岩崎 俊[†]

Shun Iwasaki

菅原 一孔[‡]

Kazunori Sugahara

1 はじめに

近年、家庭へのインターネット環境の普及や通信技術の向上により、遠隔地から家電にアクセスし、省電力を目的とした電源制御や部屋状況の管理が行える家電が登場し始めた [1]. しかし、このような機能を持った家電は一般的に高価な上、メーカーやシリーズによって独自のインターフェースを用いているため、複数台の家電を管理する為には同一メーカーのシリーズに統一する必要があった。

そこで、本研究室では家電を利用する際に必要となる電源コンセントの部分に注目し、電源コンセントと家電の間にセンサやリレー回路を搭載した装置（以降アダプタと称す）を付けて、家電の電源制御や部屋のモニタリングを行う、多機能コンセントシステムを開発した [2]. また、以前のシステムでは、ケーブルを用いてアダプタ間通信を行っていたが、部屋の間取りによっては設置困難になることや、システムに参加するアダプタの台数の増加に伴ってケーブル本数が増え、設置コストがかかるという配線の問題から、ZigBee 規格 [3] の無線通信モジュールである XBee [4] を用いて無線化を行った。

しかし、無線通信においても、アダプタ数が増加するにつれ通信が不安定になり、ネットワーク構築ができないという問題が生じた。これは、ネットワーク構築時に各アダプタから送信されるパケットがアダプタ台数に比例して増加することや、通信時においても総パケット数が増加する事によりアダプタの処理能力を超えたため、得られるはずのパケットが消失していることが原因と考えられる。パケット消失問題を解決するために、永田らの研究 [5] では複数のチャンネルを用いた通信方法が研究されているが、この方法ではチャンネルごとにネットワークを管理する装置が必要となる。また、利用している無線通信モジュールの通信帯域が無線 LAN 等と同じ 2.4GHz 帯であるため、状況によっては未使用のチャンネル数が少なくなり、アダプタ台数が増加した際に割り当てるチャンネルがなくなる問題がある。そこで、本研究では、利用するチャンネルを増やすのではなく、同時通信量の削減による対応をする事とし、ネットワーク構築を全台同時に行うのではなく分割して行うと共に、クラスタを用いたルーティング手法を用いることで、パケット消失の可能性を低減させ、アダプタ台数の増加によってネットワークが構築できない問題を解決した。

2 無線多機能コンセントシステム

2.1 システム構成

図 2.1 に無線多機能コンセントシステムの構成を示す。

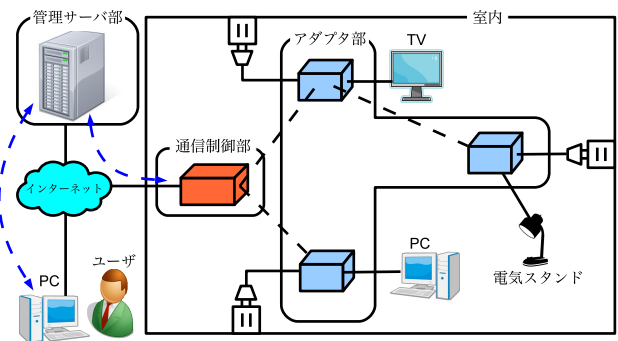


図 2.1: 無線多機能コンセントシステムの構成図

本システムは、センサネットワークを管理する通信制御部、各種センサデータの測定・送信や、家電の電源制御を行うアダプタ部、収集したデータの管理や家電の電源 ON/OFF のスケジュールデータ（以降スケジュールデータと称す）の送信を行う管理サーバ部により構成される。また、モバイルアドホックネットワーク (Mobile Ad hoc Network: 略称 MANET) を形成可能な無線通信モジュールである ZigBee 規格の XBee を用いており、通信制御部と直接通信できないアダプタとも他のアダプタを中継することで、広範囲に渡る命令の送信やセンサデータの収集が行えるため、センシング範囲を拡大する事ができる。またデータを中継するアダプタが故障した際でも、複数の通信経路が確立できるので、耐故障性にも優れている。以下では、本システムを構成する通信制御部、アダプタ部、管理サーバ部について説明する。

2.2 通信制御部

通信制御部は、無線多機能コンセントシステムの中核となる部分であり、XBee を用いて各アダプタと無線通信を行っており、管理サーバから送信されてくるスケジュールデータを元に、アダプタへ家電の電源 ON/OFF 命令を送信する機能や、アダプタから送信されるセンサデータを、管理サーバへ中継する役割を持つ。通信制御部がアダプタと管理サーバとの通信を仲介することにより、処理能力の乏しいアダプタにかかる負荷を低減する。

[†]鳥取大学大学院 工学研究科 情報エレクトロニクス専攻

また、アダプタ群を連結する無線ネットワークを管理する役割もあり、各命令を送信することで、命令に得られたデータを元にルーティングテーブルを作成・配布し、ネットワークの構築を行うことや、再構築が可能となる。

2.3 アダプタ部

アダプタは、制御マイコン、XBee、光、温度、赤外線、電流の各センサ、リレー回路から構成され、各種センサを用いて、部屋状態のデータを取得することや、通信制御部から送信されるスケジュールデータを元に、リレー回路を用いて家電の電源制御を行う役割を担っている。アダプタの写真を図 2.2 に示す。

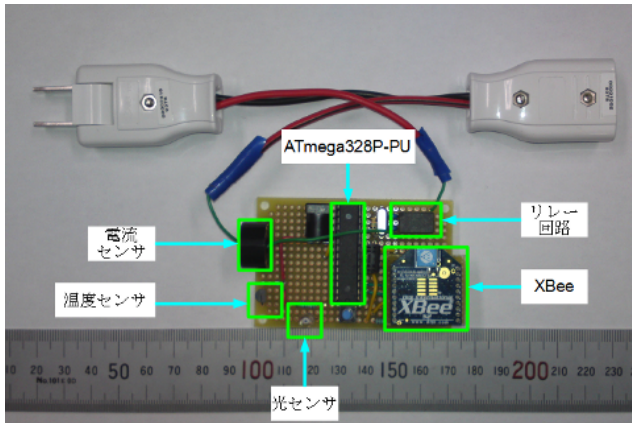


図 2.2: アダプタの全体図

また他のアダプタからのパケットデータを中継する機能を持っているため、通信制御部から直接通信できない場所に存在するアダプタに対しても命令の送信やセンサデータの取得が行えるため、センシング範囲の拡大が可能である。

2.3.1 搭載センサ

アダプタには、部屋の照明を確認するための光センサ、室温を確認するための温度センサ、家電の使用の有無を判断するための電流センサ、部屋内の人の有無を確認するための、赤外線センサを搭載している。複数のセンサを搭載することにより、例えば、光と赤外線センサから得られたデータを複合することで、人が不在である部屋の照明がついてるといような、各センサ単体では得られなかった状態が取得でき、より正確な部屋状態を取得できるため、電力消費の無駄を検知することができ、省エネにつながるという。

2.4 管理サーバ部

管理サーバは、通信制御部が収集したセンサデータを管理する役割を担っている。これによりユーザは、ブラウザを用いて各アダプタから得られたセンサデータの値を閲覧することができる。図 2.3 は、ある部屋での光センサの値だが、このデータを見ることにより、20時から

20時45分までの間はずっと照明がついていたことがわかる。

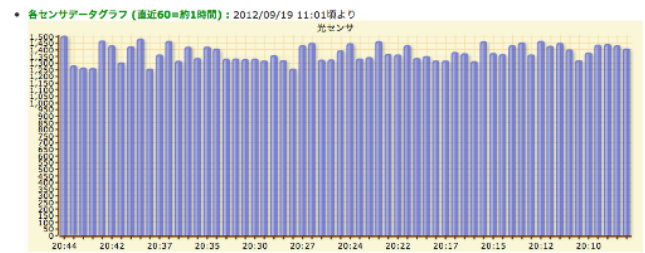


図 2.3: ブラウザを用いたセンサデータグラフの閲覧

また、図 2.4 のように、日時指定、曜日指定、毎日指定で家電の電源スケジュールの設定や、遠隔地から家電の電源 ON/OFF が行える。加えて、センサの値が規定値以上になった場合、電源の ON/OFF を行うといった設定も行える。

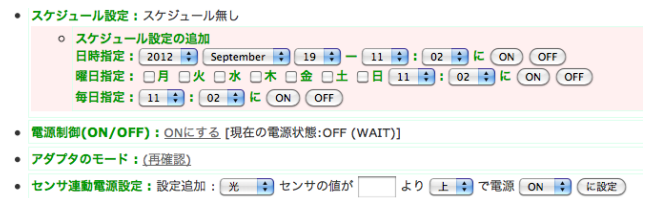


図 2.4: 家電管理スケジュール設定

3 無線多機能コンセントシステムにおける問題点

ネットワーク構築において、以前のシステムではアダプタ台数が 4, 5 台程度のネットワークの構築は問題なく行えた。しかし、アダプタ台数が増加するにつれ、構築失敗頻度が増加し、10 台を超えるネットワークは構築できなかった。この原因は、通信制御部へ各アダプタから送信される総データ量がアダプタ台数の増加に伴い増えることにより、通信制御部の処理能力の限界を超えてしまうことや、各アダプタから同時にデータが送信されることによるパケット衝突などにより、得られたはずのデータが消失してしまったことにあると考えられる。そこで、本研究では、ネットワーク構築法やルーティング法を変更することにより、この問題の解決を行った。

4 通信量別安定性実験

4.1 概要

ネットワーク構築が不安定になる原因として、無線ネットワーク内全体での同時通信負荷が過大である事や、全体の平均としては問題がなくても、いくつかのアダプタに対しての通信負荷が過大である事が予想される。本節では、この予想を確認すると共に、それぞれの通信可能な限界値を確認する為に、アダプタ数と送信パケットサ

イズを変更しながらアダプタ間の同時通信実験を行い、各条件でのパケットロス率を測定した。

4.2 実験方法

各アダプタを図4.1に示すように配置し、アダプタ台数を、10、15、20、25、30台、送信パケットサイズを50、100、150、200Byteと変化させていき、各アダプタから通信制御部に向けてパケットデータを送信する処理を、5秒間隔で30分間行った。この配置は、アダプタが密集して配置されるのを防ぐため、アダプタ間距離を1m以上離すように設置してある。また、送信データには各アダプタのデータ送信回数を付しており、受信データのログよりパケット消失の有無を確認する。

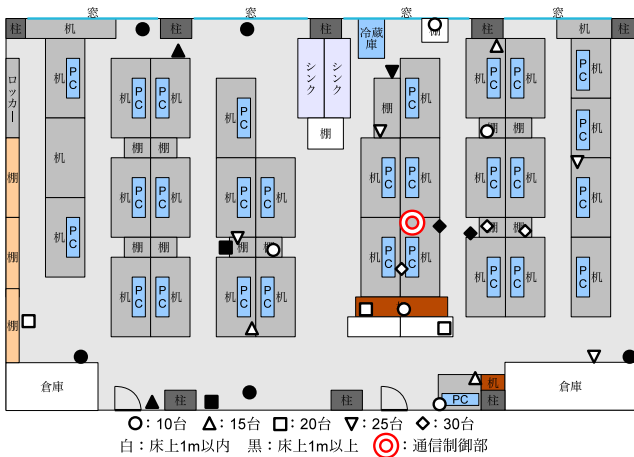


図 4.1: パケット衝突テストにおけるアダプタ配置図

4.3 実験結果

得られた実験結果を表 4.1, 図 4.2 に示す。

表 4.1: パケット衝突実験における各条件でのパケットロス率

| アダプタ台数 (台) | パケットサイズ (Bytes) | | | |
|------------|-----------------|-----|-----|-----|
| | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 10 | 0% | 6% | 9% | 12% |
| 15 | 0% | 7% | 15% | 30% |
| 20 | 0% | 30% | 43% | 56% |
| 25 | 0% | 42% | 56% | 76% |
| 30 | 0% | 53% | 65% | 80% |

表 4.1 より、アダプタ台数や送信パケットサイズが増加するにつれ、パケットロス率が増加することがわかる。これにより、アダプタ台数が増加するにつれデータ通信が不安定になる原因は、ネットワーク内の総パケット数増加による、パケットロスの発生だと推定できる。また、問題となっているネットワーク構築が不安定となった時の条件は、10台のアダプタで、200Byteの packets を送信するものだったことから、実験結果より、パケットロス率が10%を上回る通信は不安定になると推定できる。また、送信パケットサイズが50Byteの時アダプタ台数

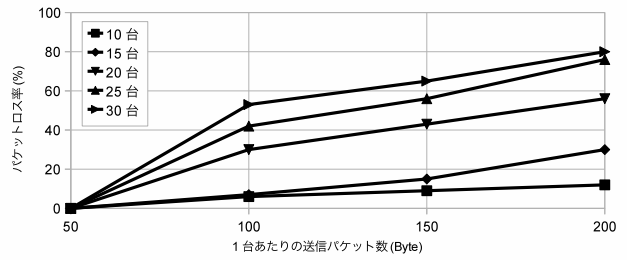


図 4.2: パケット衝突実験の結果グラフ

によらず、パケットロス率が10%を下回っていた。よって、送信パケットサイズが50Byteを超えるデータを送信する際には、送信データを50Byte程度のデータに分割して送信する事により、パケットロス率を低減できると推測できる。また、同時通信の台数は、アダプタ台数が15台から20台となった場合にパケットロス率が大幅に上昇している事から、15台以下が望ましい。次節では、この実験結果をふまえ、ネットワーク構築を行っていく。

5 ネットワーク構築

5.1 提案ネットワーク構築法

先述した、安定性実験により、同時通信量と送信パケットサイズが増加するにつれ、パケットロス率が増加することがわかった。また、ルーティングテーブル作成の際に、各アダプタ間の電波強度が必要となるが、XBeeの仕様上、電波強度の測定は最後の受信データに対する測定であるため、以前のシステムのように、全台同時に電波強度取得の処理を行ってしまうと、図5.1に示すように、AB間の電波強度を測定したつもりが、AC間の値になっていたという様に、計測したい通信とは別の通信の電波強度を測定してしまうことがあり、誤ったルーティングを作成し、通信が不安定となることがある(図5.1中のDBは、アダプタ間の電波強度取得コマンドである)。

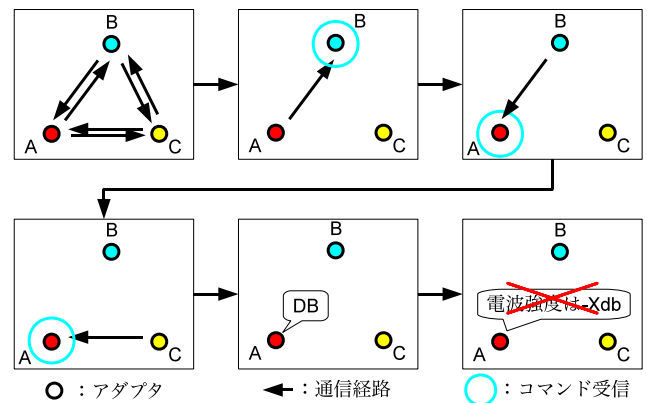


図 5.1: 誤った電波強度取得の例

そこで、本節では、一度に発生する総通信量とパケットサイズを抑え、より正確な電波強度を取得できる段階

的ネットワーク構築法を提案した。提案ネットワーク構築法を以下に示す。また、周囲のアダプタを探索するコマンドをNDコマンド、ネットワークのアダプタを識別する為の固有値をアダプタID、発見したアダプタを格納する領域をリストと称す。尚、以下の手順は図5.2と対応する。

1. 通信制御部が5秒間NDコマンドを実行
2. 応答があったアダプタIDをリストに追加し、通信制御部を親とした仮ルーティングテーブルを作成、送信し、各アダプタとの電波強度を測定
3. 2. が完了次第、リストからアダプタIDを一つ取り出し、NDコマンド命令を送信
4. 受信したアダプタは5秒間NDコマンドを実行
5. 5秒後、発見したアダプタとの電波強度を測定
6. 得られたデータを通信制御部へ送信
7. 通信制御部は、1分間待機して、アダプタからの応答がなければ4.へ、途中で応答があれば次のアダプタに対して命令を送信
8. 受け取ったデータの中に新しいアダプタがあれば、そのアダプタIDをリストに追加
9. リスト内の全てのアダプタに対して命令が完了したなら、ルーティングテーブルを作成・配布
10. ネットワーク構築完了コマンドを送信
11. ネットワーク構築完了

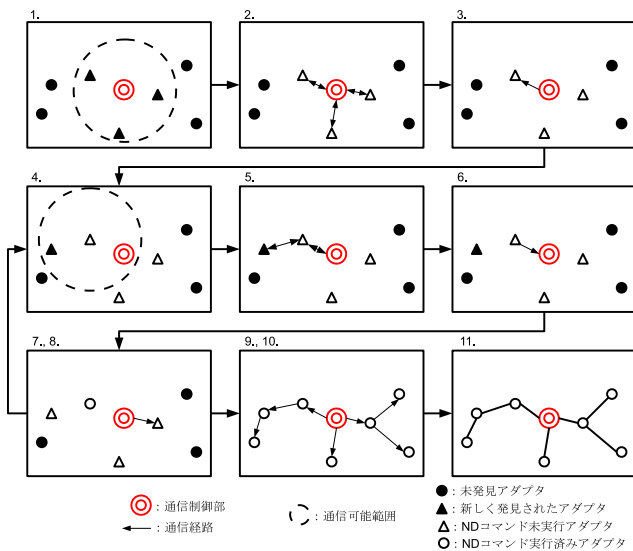


図 5.2: 提案構築法

以前の方法では、3. の処理を通信制御部が発見したアダプタすべてに対して同時に行っていた。そのため、コマンドにより得られたデータを、全台同時に通信制御部へ送信したため、アダプタ台数の増加に伴い、通信制

御部にかかる負荷が増大し、ネットワーク構築ができない場合が生じた。しかし、提案した構築法では、3. の処理を1台ずつ行うことにより、通信制御部へ送信されるデータは1台分となったため、負荷を軽減でき、パケットロスの低減が行えた。

5.2 ネットワーク構築実験 1

5.2.1 実験概要

実際に問題なくネットワーク構築が行えるか確認するため、10台のアダプタを用いた構築実験を10回行った。配置は、様々な家電の使用状況を想定するため、物陰等の電波が届きにくい所や、机の上等の届きやすい場所に分散配置した。アダプタの配置を図5.3に示す。

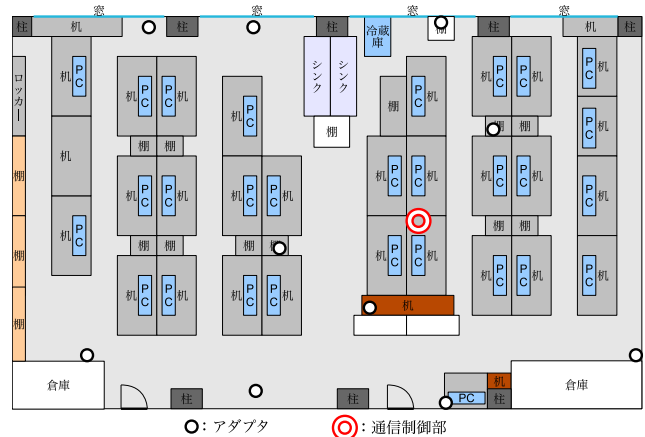


図 5.3: ネットワーク構築実験 1 のアダプタ配置図

5.2.2 実験結果

すべての実験において、各アダプタからのセンサデータの受信や、ルーティングテーブルデータの送信が行えたため、問題なくネットワーク構築が行えたといえる。

5.3 ネットワーク構築実験 2

5.3.1 実験概要

先程の実験に加えて、アダプタ数がさらに増加した場合にネットワークが構築可能かを調べる為、30台のアダプタを用いた構築実験を行った。配置は、先程の実験と同様の条件で配置した。アダプタの配置を図5.4に示す。

5.3.2 実験結果

10台の時と同様、センサデータのやり取りや、テーブルデータ等を中継送信するアダプタ間通信が行えた。これにより、研究室や一般家庭と言った、アダプタ数が20台以上必要な中規模環境においても、システムが動作するといえる。

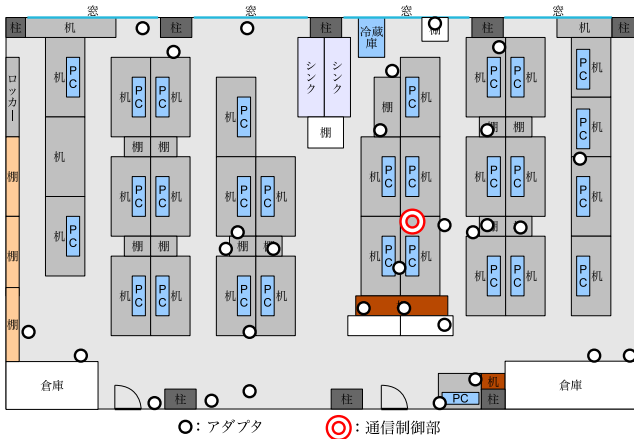


図 5.4: ネットワーク構築実験 2 のアダプタ配置図

6 無線多機能コンセントにおけるルーティング

6.1 概要

アダプタ間のデータ通信を安定して行うためには、1アダプタにかかる負荷を低減させ、パケットロスを防ぐ必要がある。しかし、今まで利用していたダイクストラ法を用いたルーティングでは、ほとんどのアダプタが通信制御部と直接通信する形になる場合が多く、アダプタ台数が増加した際にパケットロスが発生する。そこで、いくつかのクラスタを形成し、クラスタ内のアダプタ間通信は、一旦クラスタヘッドと呼ばれる、クラスタ内の代表アダプタと行い、通信制御部との通信はクラスタヘッドのみが行うことで、負荷を各アダプタへ分散することができ、パケットロスを抑えたルーティングが構築できる。

6.2 提案ルーティング手法

今回、多機能コンセントシステムで利用するルーティング手法は、凝集法 [6] をメインとしたアルゴリズムを用いた。凝集法とは、階層型クラスタリング法の一つであり、全対象間のコストのうち一番コストが低い者同士を一つのクラスタにする方法である。この方法により、電波強度の強いアダプタ同士が通信経路として選択され、最も通信強度の高い通信経路を形成する事ができる。凝集法の構築手順を以下に示す。

1. 各アダプタをそれぞれ1つのクラスタとする
2. 最もクラスタ間の電波強度が強いクラスタ同士を一つのクラスタとする
3. 全てのアダプタが一つのクラスタになるまで繰り返す

しかし、凝集法は1クラスタあたりのアダプタ数の上限がないため、アダプタをうまく分散する事ができず、図 6.1 のような多数のアダプタを持つクラスタが生成される場合がある。

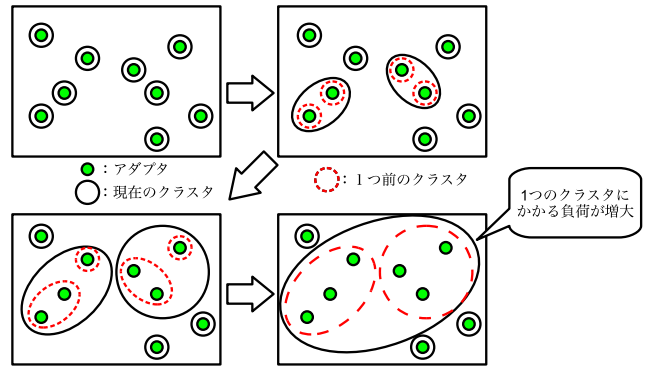


図 6.1: 凝集法の問題点

そこで、図 6.2 のように、1クラスタあたりのアダプタ数の上限を決めることで、これらの問題を抑制する。これにより、1クラスタが膨大になるという事態を防ぐことが出来る。

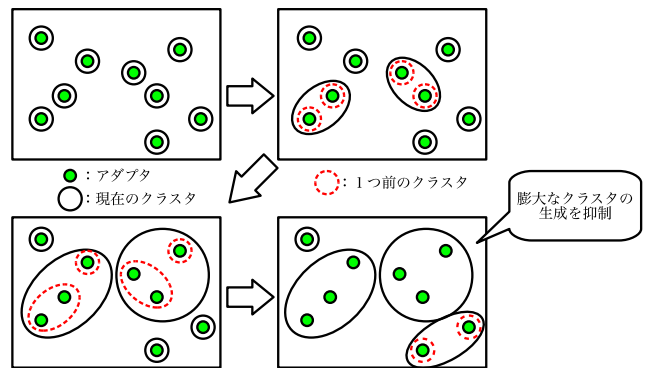


図 6.2: クラスタ内のアダプタ数を決めた場合

6.3 ルーティング実験

提案手法の有効性を検討するため、提案手法に加え、従来法であるダイクストラ法および、新しく発見されたアダプタは発見したアダプタの子どもとする標準的なやり方 (以降標準手法と称す) の3つの手法を用いて20台のアダプタを用いたネットワークを構築し、比較実験を行った。配置は、これまでの実験と同様に、実際の使用状況を想定した配置としてある。また、アダプタの配置図を図 6.3 に示す。

6.3.1 実験結果

各手法を用いたルーティング結果を図 6.4, 図 6.5, 図 6.6 に、各種法における1台당りにかかるアダプタ数と、パケットロス率結果を図 6.7 に示す。

実験結果より、1台当りの最大負荷台数が標準手法では20台、従来手法では16台となったが、提案手法では、5台となり、通信制御部と直接通信するアダプタ台数を抑制することができた。また、図 6.7 より、標準手法、従

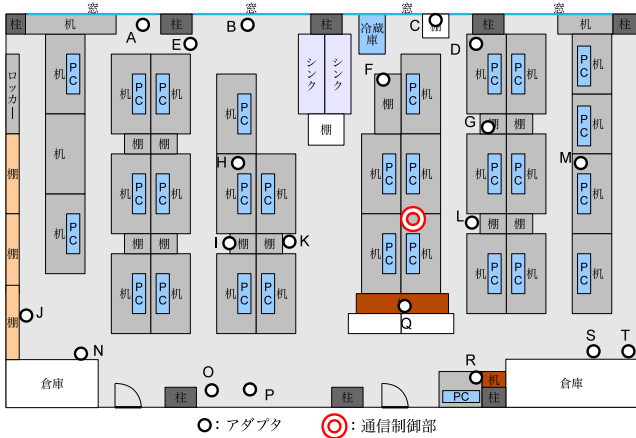


図 6.3: アダプタ配置図

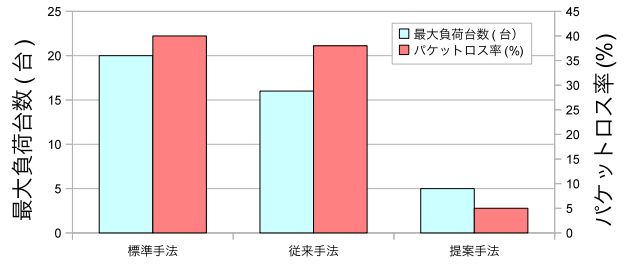


図 6.7: 各種法における最大負荷アダプタ数とパケットロス率

来手法と比べて提案手法ではパケットロス率を低減できる事がわかる。

7 おわりに

本研究では、中規模ネットワーク構築のためにまず、ネットワーク構築法の改良を行った。以前のシステムでは、ネットワーク構築時に全台同じに通信することがあったため、通信制御部への負荷が増大し、構築できない事があったが、今回提案した手法を用いることで、同時にかかる通信制御部への負荷を低減することができ、30台を超えるネットワークの構築が可能となった。また、ルーティングにおいても改良を加えることにより、今まで通信制御部へすべてかかっていた負荷を他アダプタへ分散することにより、処理能力不足による取得データの欠落を防ぐことができ、より安定したネットワークの構築が可能となった。これらの手法を取り入れることにより、中規模センサネットワークの構築が可能となった。

参考文献

- [1] スマート家電. <http://panasonic.jp/pss/>.
- [2] 明山寛史, 川村尚生, 笹間俊彦, 菅原一孔, 齊藤剛史, 小西亮介. スケジューリングによる待機電力削減機能を持つ多機能コンセントの開発. 第51巻, 2010.
- [3] ZigBee Alliance. <http://www.zigbee.org/>.
- [4] XBee ZB Digi International. <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-zb-module>.
- [5] 永田純子, 谷川陽裕, 戸出英樹, 木下和彦, 村上孝三. 複数のチャンネルを用いた高密度な zigbee ネットワーク構築手法. 2009.
- [6] 千田智治, 廣安知之, 三木光範. 凝集法と k-means 法. No. 20081014002, 2008.



図 6.4: 標準手法におけるルーティング結果

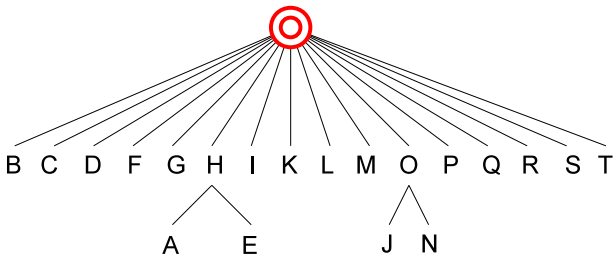


図 6.5: 従来手法におけるルーティング結果

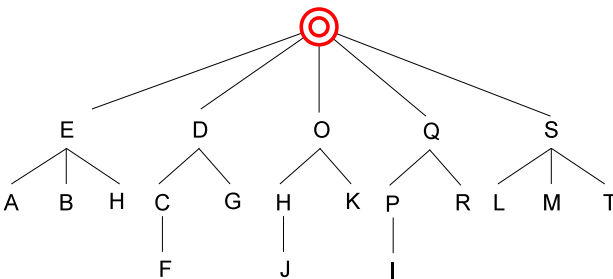


図 6.6: 提案手法におけるルーティング結果