

無線アドホックセンサネットワークにおける 低消費電力ルーティングの研究

2001MT084 大坪 伸光 2001MT087 佐藤 元香 2001MT110 山崎 由香里
指導教員 後藤 邦夫

1 はじめに

現在、測定対象エリア内に配置された各センサが取得する情報を無線通信によって収集し、処理、制御、管理を行うセンサネットワークシステムが注目されている。しかし、無線センサネットワークにおけるルーティング方式は確立されておらず、未だ研究段階である。

あるガス会社では大規模商業施設や、住宅地向けに無線ネットワークを利用するガスの自動検針システムを検討している。数年間電池交換なしで利用できるシステムを目指しているため、通信のリアルタイム性を確保した上での無線端末の配置の考案と、ルーティングプロトコルの確立が課題となっている。

本研究では、あるガス会社の端末配置モデルを利用する。各端末はガスメーターの近隣に設置されるため固定となる。そのため、AC電源を持つ基地局の設置場所やルーティング方式によるシステムの省電力化に着目する。そこで我々はRIP(Routing Information Protocol)[1]を参考にして最短通信経路を選択するルーティング方式と、GAF(Geographical adaptive fidelity)[2]を参考にした低消費電力ルーティング方式を検討する。

大坪、山崎は主にプログラム作成を、佐藤は主にモデル作成を担当した。

2 モデル

一般的なセンサネットワークモデルと、本研究における無線通信モデル及び端末配置モデルを説明する。

2.1 センサネットワークモデル

センサネットワークとは無線通信機構とセンサを備えた小型かつ省電力の無線端末を大量に分散させ、各端末が取得するセンサデータをアドホックネットワークを通して配信するための基盤技術で、人が立ち入れない場所からでもデータ収集が可能であるなどの特徴がある。

2.2 本研究における無線通信モデル

本研究では、ある大規模商業施設、集合住宅におけるアドホック無線センサ端末を用いた公共料金の自動検針システムでの、無線端末の電力消費を考える。

基地局が定期的にガスメーターのデータを収集する。ある端末の電力が基準より低下してしまった場合には、問題の端末の使用を抑えた転送経路を再構築し、各端末及びネットワーク全体の長寿命化を目指す。

■無線端末の仕様 本研究で想定する無線端末は、無線方式にARIB STD-T67を採用し、802.11などより無線出力が小さく通信性能は劣るが省電力である。端末の信頼できる通信可能範囲は障害物がない場合で最大

100m、コンクリートなどの障害によっては30mとなる可能性がある。総電力量は約4200mAh、待機時、受信時、送信時の消費電力はそれぞれ0.015mAh、15mAh、40mAhとする。現在発表されている製品は、AC電源駆動などだが、本研究ではバッテリー動作で数年稼働することを目標とする。

■通信データ量と通信時間 通信データ量と通信時間は以下の通りとなる。

検針時のデータは1時間ごとの値を24時間分(1日分)まとめて収集する。データ量は2048bits、通信時間は2.53秒である。

経路情報交換は1日1回行い、その際の通信データ量は $24 \times (\text{端末の個数}) \text{bits}$ となる。通信時間は、ある大規模商業施設の配置モデルで1秒、住宅の配置モデルでは2秒である。

2.3 端末配置モデル

以下に示す2通りの配置モデルを想定した。

■大規模商業施設 大規模商業施設を上から見た2次元モデルで、エリアは横約170m×縦約110mである。端末は29個配置し、第5.3節での基地局候補をすべてのルーティング方式に適用した。

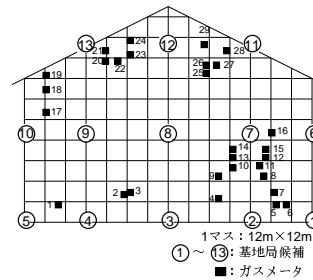


図1 大規模商業施設モデル

■住宅 集合住宅を正面から見た2次元モデルで、エリアは横63m×高さ50mである。端末は60個配置し、基地局候補はあるガス会社の想定を参考にした。

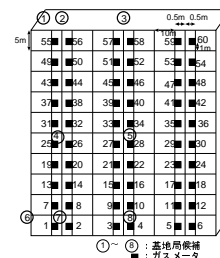


図2 住宅モデル

3 ルーティング方式

この節では、システムの長寿命化を図るため参考にしたルーティング方式を述べる。

ここで本研究における通信距離の考え方を述べる。電界強度が距離の2乗に反比例するので、ルーティングにおける端末間の距離は実距離の2乗に比例する。

3.1 最短経路固定

はじめに基地局から各端末への最短経路を決定し、経路変更しないで通信を行う。

この方法では、経路情報交換のための電力消費はないが、各端末の電力消費に偏りが生じる。また、ある端末に障害が発生した場合、自律的に経路変更することができないため、その端末を経由するすべての端末が基地局と通信できなくなってしまうという欠点もある。

本研究ではこの方式を比較基準とする。

3.2 RIP

RIP[1]とは距離ベクトルアルゴリズムを採用しているルーティングプロトコルで、いくつのルータを経由すれば通信先にデータが届くかを数値化したホップ数をもとに、最小のホップ数で到達できる経路を決定する。

しかし、ネットワークにループが含まれる場合に動作が不安定になるという問題がある。そこで、隣接するルータから受信した情報に基づいて変更された経路情報を、送信元のルータには伝えないことによって安定させる地平線分割更新方法がある。

RIPは本来小規模IPネットワーク上で利用されるルーティングプロトコルであるが、本研究ではRIPの考え方をもとに最短経路を選択し、かつシステム全体の長寿命化を図るルーティング方式を考案している。インタフェースの区別がないため、目的地やゲートウェイ、直接通信できるか否かなどのさまざまな条件を考慮に入れる必要がある。

また、RIPでは30秒毎に経路情報交換を行うため、経路情報交換のための通信に多くの電力が消費されると考える。本研究では、検針時のみ経路が構築されればよいから、経路情報交換を1日1回に減らし省電力化を図った。

3.3 GAF

GAF[2]とはネットワーク層におけるモバイル通信用の省電力通信方法である。端末の通信可能範囲をもとに物理的な空間を一定の大きさの格子に分割する。各格子内に存在するセンサ端末はルーティングを行う稼働端末と、ルーティングを行わない休止端末に分かれる。休止端末は待機状態よりもさらに少ない電力消費となる。稼働端末はある電力量を消費すると休止端末になり、周辺のセンサ端末の電力残量が少なくなると再び稼働端末として動作する。

この方法により通信可能な端末が格子内で必ず1台稼働しているため、常に通信経路が確保でき、通信速度を保つことができる。さらに休止端末を作ることで電力の消費も抑えられる。

例えば、図3において、端末1は端末2, 3, 4と通信でき、端末2, 3, 4は端末5と通信できるとする。よって、端末1は端末2, 3, 4のいずれかを經由して端末5と通信可能となる。そのため、消費電力量に基づいて端末2, 3, 4のうち2つは休止端末となって消費電力を抑えることができる。

また格子の一辺の長さ r は通信可能範囲を R として、 $r = \frac{R}{\sqrt{5}}$ である。

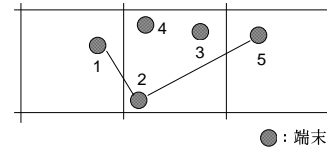


図3 GAFの省電力挙動

4 シミュレーション

前述した各ルーティング方式を用いた場合のシステムの寿命を調べるためにシミュレーションを実行した。

4.1 最短経路固定

まず最短経路固定方式で、比較対象とする基準値を求めるために、各配置モデルにおける総通信日数を調べた。なお総通信日数とは、全ての端末の電力残量がある状態で通信できる日数のことである。

4.2 RIP(動的 shortest経路)

RIPの経路決定の基準は最短通信距離を選択することである。今回のルーティングアルゴリズムではこのRIPの決定基準を応用し、端末を中継する場合の通信距離は(通信距離) = 距離 A + 距離 B + M で求める(図4)。 M は電力残量をもとに計算され、電力残量が少なくなるほど大きな値を与える。以後この M の値をインタフェースメトリックとした。

例えば、図4の端末2の電力残量が少なくなるほど、端末1から端末3までの距離が大きくなり、別の経路を選択するようになる。これにより、電力残量の少ない端末を避けて通信を行うことになるため、偏った電力の消費を回避することができる。

この実験では、インタフェースメトリックの計算式及びパラメータの値を変えて、総通信日数の変化を調べた。

4.3 GAF

第3.3節で述べたGAFの考え方をもとに各配置モデルを格子で区切り、シミュレーションを実行した。

本研究では、各格子内で電力残量が最も多い端末のみ稼働端末とする。このとき休止端末はデータ送信のみ可能とした。全端末は稼働端末を経由して基地局と通信を行う。端末の電力残量の比較は1日に1回行う。格子間経路は固定とする。

ある格子内の端末が次にどの格子内の端末を経由するか、様々な組合せを作成した。全ての組合せでシミュレーションを実行し、その中で総通信日数が最長となる経路を調べた。

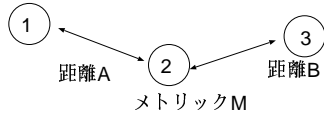


図4 インタフェースメトリック

5 実験結果と考察

シミュレーション実験の結果と考察を述べる。

5.1 最短経路固定

最短経路経路固定方式での総通信日数を調べた。

大規模商業施設の配置モデルでは、通信可能範囲 100m とした、基地局候補 13ヶ所のうち、8 に配置したとき総通信日数 4519 日と最長であり、10 に配置したとき総通信日数 2897 日と最短であった。

住宅の配置モデルでは、通信可能範囲 40m とした、基地局候補 8ヶ所のうち、8 に配置したとき総通信日数 3191 日と最長であり、2 に配置したとき総通信日数 1193 日と最短であった。

5.2 RIP

以下の式 (1) から (3) の 3 通りのインタフェースメトリック実験式についてシミュレーションを実行した。

$$M_1 = a \times \frac{1}{(\text{電力残量})} \quad (1)$$

$$M_2 = \frac{255}{e^{-\lambda}} \times \lambda e^{-(\text{電力残量})\lambda} \quad (2)$$

$$M_3 = \frac{255}{1 - e^{-4200\lambda}} \times (1 - e^{-\lambda(4200 - (\text{電力残量}))}) \quad (3)$$

a および λ は曲線の形状を決めるパラメータである。

式 (1) は、電力残量が限りなく 0 に近づいたときに急激に増加するという特徴を持つ。

式 (2) と (3) は、最小で 0、最大で 255 の値を与える。

式 (2) は、電力の減り始めは緩やかに増加するが、電力残量が少なくなると急激に増加する。逆に式 (3) は、電力の減り始めは急激に増加し、電力残量が少なくなると緩やかな増加となる。

■大規模商業施設 各インタフェースメトリック式を用いて、各基地局でのより長い総通信日数を調べた結果が図 5 である。

この結果より、式 (1) と式 (2) ではどの基地局候補のモデルにおいても最短経路固定の総通信日数よりも大きな値が得られ、メトリック実験式が有効であると考えられる。式 (3) では他の 2 式と同等の値が得られる場合もあるが、効果が得られない基地局候補が全体の約半数となった。

以上より、式 (1) と式 (2) を使用した RIP 方式はシステムの長寿命化に効果がある。特に式 (1) ではほぼ全基地局候補でどの実験式よりも長い総通信日数となることが分かった。

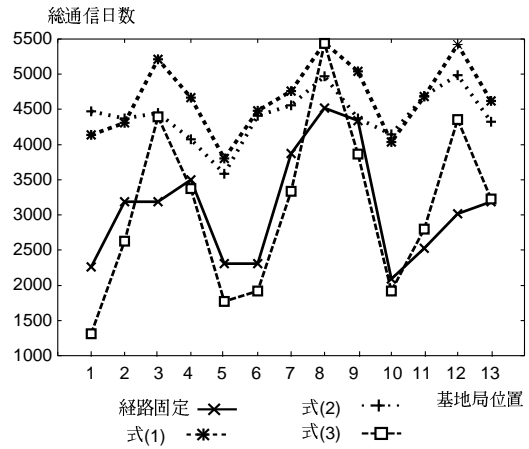


図5 総通信日数の変化 (大規模商業施設)

式 (2) のモデルの通信最終日の各端末の電力残量の分散を求めた結果が図 6 である。これは、最短経路固定方式での結果と比較している。ここから分かることは、最短経路固定方式での電力残量の分散よりも、式 (2) を使用した RIP 方式での分散のほうがどれも小さな値であるということである。すなわち、インタフェースメトリックを利用して電力残量の少ない端末を避けて通信することにより、偏った電力の消費を回避できていることが分かる。

■住宅 住宅モデルに対しても 3 つのインタフェースメトリック実験式を比較した。詳しいシミュレーション結果は割愛する。基地局候補によっては総通信日数の増加が見られない場合があった。基地局候補 1, 2, 3, 5 では最短経路固定の総通信日数を上回ったが、基地局候補 4, 6, 7, 8 では最短経路固定を下回った。大規模商業施設モデルに対して住宅モデルは端末が密集しており、それに伴い経路末端の選択が複雑になると考える。

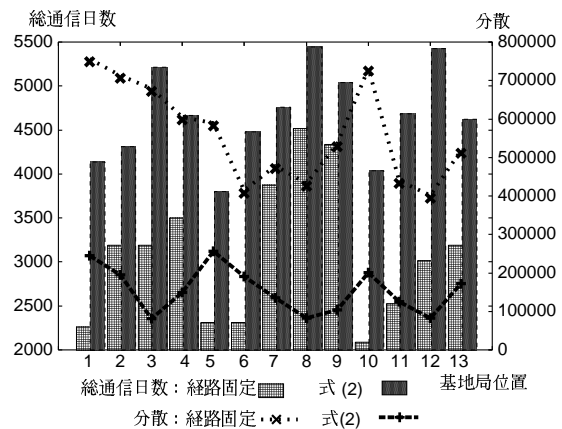


図6 総通信日数と電力残量の分散

5.3 GAF

■大規模商業施設 端末の通信可能範囲は半径 100m の円、格子の辺の長さは $20\sqrt{5}$ m とした。作成した経路のうち、各基地局候補における最長の総通信日数を図 7 に示す。

基地局候補 4, 5 で経路固定よりも総通信日数が減っているのは、基地局に接している格子内に端末が数個しかなく、負担が偏るためであると考えられる。表中で総通信日数が最長となった基地局の位置はエリアの中央となった。

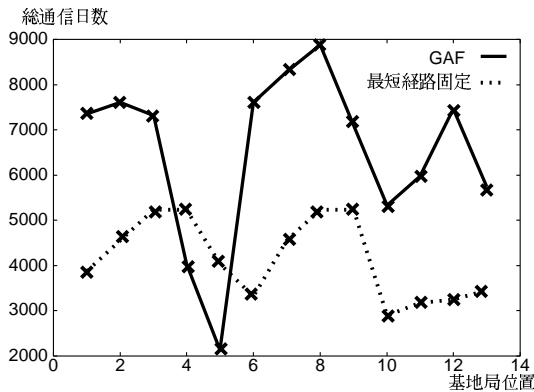


図 7 GAF によるシミュレーション結果 (大規模商業施設)

■住宅 端末の通信可能範囲は 30m とした。格子の辺の長さは $6\sqrt{5}$ m である。この条件では、基地局に接する格子内に端末が存在しないという理由から通信不能となる基地局候補が存在した。次に通信可能範囲を 40m とした。格子の辺の長さは $8\sqrt{5}$ m である。この条件では、最短経路固定方式での通信より総通信日数が飛躍的に伸びた。しかし住宅ではコンクリートの障害があると考えられ、通信可能範囲 30m になる可能性がある。よって、いくつかの基地局候補では GAF 方式の採用は困難である。詳しいシミュレーション結果は割愛する。

5.4 各プロトコルの比較

図 8 は、最短経路、RIP 方式、GAF の 3 つのプロトコルの総通信日数を比較した結果である。GAF が他の 2 つに比べて最長の総通信日数を得ることができた。しかし GAF では無線端末を稼働端末と休止端末に切替えるという機器的な問題や、格子が作成できない場合などの条件を満たさなければ実現が困難である。一方 RIP 方式は機器の性能に関係なく、比較的容易に実現することができる。経路固定に関しては、RIP 方式に比べるとルーティングテーブルの更新を行う必要がないため電池消費の節約はできるが、端末に障害が発生したり、通信経路が遮断された場合に通信不能になるという大きな問題点がある。

6 おわりに

本研究では、大規模商業施設や住宅地向けのガスの自動検針システムを数年間電池交換なしで利用できるこ

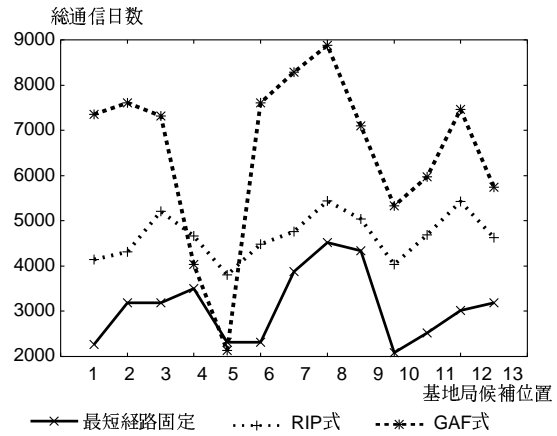


図 8 各プロトコルの比較

とを目指した。最短経路固定方式と比較してシステムの省電力化を実現するために考えた方法は以下の通りである。

1. 基地局は、基地局と直接通信できる端末数が多くなるようなところに設置する。
2. インタフェースメトリックにより、電力残量の少ない端末を避けて経由するようにする。
3. エリアを格子で区切り、端末を休止端末と稼働端末に分け通信する。

2 については、第 4.2 節からインタフェースメトリックを用いた RIP 方式は電力消費を分散できるため、システムの長寿命化に効果的だと言える。しかし、配置モデルによっては効果が得られない場合もあった。この場合は、RIP 方式のように毎日の経路情報交換は行いがインタフェースメトリックを考慮に入れずに行うことによって、通信のリアルタイム性を確保できると考える。3 については、第 4.3 節から休止端末を作成し電力消費を抑えるルーティング方式が長寿命化に効果的だと言える。しかし、使用する機器の性能も関係するため、実現に困難な場合もあると考えられる。

参考文献

- [1] G. Malkin: RIP Version 2, RFC2453, 1998.
- [2] Ya Xu, John Heidemann, Deborah Estrin: Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing, Proc. of ACM/IEEE Intel. Conf. on Mobile Computing and Networking, PP.70-84, 2001. also(<http://www.isi.edu/~johnh/PAPERS/Xu01a.pdf>)
- [3] 早稲田大学理工学部 柳澤研究室: センサネットワーク, <http://www.yanagi.comm.waseda.ac.jp/sensornet>, 2004.