

静岡大学 博士論文

消費電力指向の無線センサ
ネットワーク制御に関する研究

2007年12月

大学院理工学研究科
設計科学専攻
小橋 喜嗣

目次

1.	序論	2
1. 1	研究背景とその目的	2
1. 2	従来の研究の概観	5
1. 3	本研究の特長と概要	8
1. 4	論文の構成	9
2.	無線センサネットワークの構成と適用アプリケーション	11
2. 1	無線センサネットワークの構築技術	12
2. 2	無線センサネットワークにおけるネットワーク制御技術	19
2. 3	無線センサネットワークの適用アプリケーション	23
3.	flat-based routing における消費電力を意識した経路制御の研究	33
3. 1	消費電力を意識した経路制御の研究経緯	33
3. 2	消費電力を意識した分散型経路制御アルゴリズムの研究経緯	41
3. 3	最大ネットワークライフタイム指向の経路制御の定式化の提案	45
3. 4	最大ネットワークライフタイム指向の分散型経路制御アルゴリズムの提案	48
3. 5	シミュレーション評価	52
3. 6	まとめ	55
4.	hierarchical-based routing における消費電力を意識した経路制御の研究	56
4. 1	改良型 LEACH プロトコル	57
4. 2	改良型 LEACH プロトコルのシミュレーションおよび実験による評価	61
4. 3	まとめ	68
5.	結論	69
	謝辞	71
	参考文献	72
	筆者発表論文	81

第1章 序論

1. 1 研究の背景とその目的

複数のセンサノードが広い領域に配置され、それらセンサノードから得られた情報を、ネットワークを介して収集する形態のセンサネットワークは、従来から様々な場面で活用されてきた。例えば、テレビやインターネットの天気予報で使われている、アメダス (AMeDAS: 「Automated Meteorological Data Acquisition System」) [気象庁 2007]は、1974年に開始され、現在全国の約 1300 の観測地点で、降水量、風向・風速、気温、日照時間などの観測を自動的に行い、これらの情報を、ISDN 回線などのネットワークを介して気象庁内の地域気象観測センタに集め、それらの情報を地域的にかつ時系列的に表現して分析することで、気象観測において重要な役割を果たしている。我々一般人にとっても、アメダスの情報は直感的に今後の天気がどうなるかを知る上で有用な情報として定着している。

アメダスだけでなく、工場ファクトリオートメーションを支える基盤としても、センサネットワークがどんどん導入されてきた[安藤 2005]。

最近では、センサノードの温度や光のセンサ部の小型化とともに、無線通信機能の発達が著しく、多くの点在するセンサノード間を無線で結びつける無線センサネットワーク (WSN: 「Wireless Sensor Networks」) によるアプリケーション応用が実現可能になってきている。例えば、2005年に開催された愛知万博 (長久手会場) では、20ヶ所に太陽バッテリーで動作する無線モジュールを配置し、約半年の間、温度・湿度・CO₂濃度・雨量・日射・風向風速といった環境データを収集し、インターネットを介して公開するシステムが実現された。これにより、愛知万博内のヒートアイランド現象緩和に有効な種々の先進的工夫の効果をリアルタイムに検証することを可能にした[豊田 2006]。他の例では、UC Berkley を中心としたウミツバメの生態調査への適用や[Szewczyk2004]、西宮市における環境取得実験[総務省 2005]などいくつかの実験段階の事例が見られ、無線センサネットワークの応用アプリケーションが実用レベルで利用可能な時代になってきたと考えられる。[Pottie2000] [Cerpa2001] [Chong2003] [10 Emerging2003] [Lundquist2003] [Xu2004] [Chien2005] [Wameke2005] [産総研 2006]

無線センサネットワークの将来の利用イメージは、①防災・災害対策、②防犯・セキュリティ、③食・農業、④環境保全、⑤医療・福祉、⑥施設制御(家庭・オフィス・工場等)、⑦事務・業務、⑧交通、⑨構造物管理、⑩物流・マーケット、⑪情報家電、⑫教育・学習な

ど、多種多様である[総務省 2004]。

本研究で特に関心を寄せるのは、上記①に分類される、地震など突発的な災害発生の現場で、瓦礫の下に生き埋めになった人々の救出のため、無線センサネットワークを利用するものである。(以下では「救助活動支援」アプリケーションと呼ぶ。) 人命救助のための災害現場での適用にあたっては、大量にかつ冗長的にセンサノードをばらまき、被災地という過酷な条件下で数日間稼働させる必要がある。つまりバッテリー容量の小さいセンサノードを冗長的に大量配置した無線センサネットワークを、バッテリー交換せずに、検知できる領域の網羅性を保持して、いかに長い期間機能させられるかが重要な課題になる。このアプリケーションに限定して議論を進めることは、汎用性を狭める危険があるように思えるが、前述のウミツバメ等の実験のように、固定的にセンサを設置した上で長期的な環境のモニタリングを行う「モニタリング型」とは全く異なり、「イベント検知型」という新しい分野の代表的なアプリケーションであり、将来大いに水平展開が期待できるタイプだと考える。

無線センサネットワークを適用した様々なシステムを設計する上で、考慮すべき主な観点としては、耐故障性、拡張性、構築コスト、ハードウェアの制約、センサネットワークのトポロジー、運用環境、伝送媒体(利用周波数)、消費電力などが挙げられる。従来、様々な研究が重ねられているが、まだすべてを統合した観点での設計方法は確立されていない。アーキテクチャ的には、5つのプロトコル層(物理層、データリンク層、ネットワーク層、トランスポート層、アプリケーション層)が定義されており、それぞれの層において研究や標準化が進められている[Akyildiz2002-1,2]。

本研究では、バッテリー容量の小さいセンサノードを冗長的に大量配置した無線センサネットワークを、バッテリー交換せずに、検知できる領域の網羅性を保持して、いかに長い期間機能させられるかという課題の解決を、主にネットワーク層のネットワーク制御技術の改良を中心に試みる。

無線センサネットワークのネットワーク制御技術の研究は、それより先立って行われてきたアドホックネットワークの研究成果をうまく引き継ぎ、無線センサネットワーク独特の部分はいかに埋めていくかという形で進められてきた。アドホックネットワークとは、移動可能な比較的高機能な無線端末により構築されるネットワークで、無線電波の届かない無線端末同士の通信には中間に存在する他の無線端末がデータを中継し、マルチホップ通信を行う。例えば戦場で戦隊を組んで戦う戦車同士が通信する場合や、学会などの会場でパソコンを持ち寄った研究者たちがその場限りでパソコンを介して情報交換を行う場合を

想定している。アドホックネットワークとは異なり、無線センサネットワークのネットワーク制御では、ノードの立場がすべて同等ではなく、観察者とセンサという異なる立場のノードが存在し、両者の間の通信の効率化が新規の課題となる[安藤 2005]。さらに、無線センサネットワーク特有の、センサノードの限られたバッテリー容量と、乏しいプロセッシング能力と、低い転送能力という条件下で、無線センサネットワーク全体として機能し続ける時間の長い経路制御プロトコルをいかに実現するかについても、無線センサネットワークの研究課題の大きな柱となっている[Haenggi2006] [Shah2006]。本研究では、主に後者の課題について、従来の研究成果を踏まえ改善を試みる。

無線センサネットワークを構成する基本要素の1つであるセンサノードについては、一般の研究者が実験目的に容易に入手できる時代になった。代表的なのは、Crossbow社のMICAzである。MICAzはオープンソースで開発されたTinyOSをプラットフォームとして装備し、アプリケーションに応じてセンサ部分のハードを取り替えることを可能にするとともに、このプラットフォーム上でそのセンサ部分のハード向けのドライバプログラムを作成して付け加えることを可能にしている。さらに、プラットフォーム上で独自のアプリケーションを付け加えることも可能にしている[阪田 2006]。しかし、研究者の提案する新規の経路制御プロトコルを実装するには、まだまだこのプラットフォームは機能・性能の両面で不足しているのが現状である。本研究では、MICAzを利用して、新規に提案する制御プロトコルの実装を試み、その実現性を機能・性能不足の中で評価するとともに、逆にMICAz、TinyOSの限界および改良点を明らかにする中で、将来のセンサノードへの要求条件について言及する。

以上より、本研究では、無線センサネットワークの新しい適用分野で水平展開の可能性の高いアプリケーションとして、「救助支援活動」を取り上げる。このようなアプリケーション向けのシステム構築上の、センサノードの消費電力を意識して無線センサネットワーク全体を機能させ続けることを最大化させるという課題に対して、ネットワーク層を中心に実現方法を提案し、シミュレーションを通じてその優位性を明らかにする。さらに、実際に市販のセンサノードを用いて課題解決の実現方法の構築を試みることで、その優位性をより明確にする。これらの研究を通じて、無線センサネットワークの今後のアプリケーション適用領域を拡大する見通しをたてるだけでなく、センサノードの改善の方向性を明確化し、現実的に使えるレベルにより早く達成することを目指す。

1. 2 従来の研究の概観

本節では、無線センサネットワークのネットワーク制御に関わる研究分野と、研究例のうち、特に消費電力を意識した経路制御について述べる。

無線センサネットワーク設計の最大目標は、センサノードの消費電力に制限があるためにいくつかのセンサノードが徐々に機能不全になっても、ネットワーク全体としての接続性を維持する、つまりネットワークのライフタイムをより長くすることである。このため、従来のインターネットを中心に適用されてきたプロトコルスタックを、そのまま無線センサネットワークには適用できず、以下に示す、主にネットワーク制御を中心とした課題を解決していく必要がある。

- ①ランダムに配置されたセンサノード間で、自動的にネットワーク化すること。また、一部のセンサノードがバッテリーを消費してしまい動作不能になり、ネットワークのトポロジー変化があっても、ネットワーク化を維持することが必要。
- ②センサノードは小さいため、バッテリー容量に制限がある。バッテリーの電力消費をできる限り抑え、ネットワークライフタイムを伸ばすことが必要。
- ③センサノードのプロセッサは、小型化・低消費電力のため、処理能力が大きくない。従って、軽い処理の経路制御が必要。
- ④複数センサノードをまたがるマルチホップ通信が必要。
- ⑤センサノードの一部が故障や、バッテリー不足で動作不能になっても、無線センサネットワーク全体の機能達成に影響を与えないことが必要。
- ⑥数百～数千のセンサノードを働かせる拡張性が必要。
- ⑦データリンク層のプロトコルとの整合が必要。
- ⑧トポロジー変化を妨げないセンサノード間の結合が必要。
- ⑨自動ネットワーク化の制御のためのオーバヘッドとそのための電力消費のトレードオフの見極めが必要。
- ⑩サービス品質の達成（たとえば、イベント発生後ある時間内にシンクノードに届ける必要があるサービスの実現）が必要。

上述の課題をいろいろな側面から解決すべく、無線センサネットワークのネットワーク制御技術の柱である経路制御が、数多く提案されている。

これらの経路制御に対して、いろいろな分類のしかたが存在する。代表的なのは、センサノードの構成（アーキテクチャ）がフラットな場合と階層構成の場合で、それぞれ、① flat-based routing、② hierarchical-based routing という2つ分類される。flat-based routing では、すべてのセンサノードが同じ働きをする。代表的な経路制御として、DD(Directed Diffusion)[11]が挙げられる。一方、hierarchical-based routing では、センサノードによって異なる働きをする。代表的な経路制御として、LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)[Heinzelman2002]が挙げられる。

③ adaptive-based routing と呼ばれ、すべてのセンサノードがベースステーションになる可能性を持つタイプの括りも存在する。一方、プロトコル操作によって、④ multipath-based routing、⑤ query-based routing、⑥ negotiation-based routing という括り方もある。④では、ソースノードとシンクノードの間で複数経路を維持することで、1本の経路で失敗しても、替わりの経路を使える。⑤では、データを必要とするノードがクエリを發出し、そのクエリに合致するデータを送り返す。⑥では、メタデータを用いて、データ転送量を削減する。

これらの多種多様な経路制御には、それぞれ一長一短があり適用アプリケーションとの相性もあり比較は難しいと言われている。

様々な無線センサネットワークの経路制御が提案されているが、ネットワーク全体で集中制御が必要な提案は現実的ではなく、全体の情報が収集できなくてもあるメトリックに基づいて各センサノードの経路制御を個々に行うのが現実的な手法である。これらの手法の中で、ネットワーク全体のライフタイムを伸ばす経路を選択する制御法を総称して、「消費電力を意識した経路制御」と呼ばれる。なお、消費電力を意識した経路制御は、到着側起動型のプロトコルである。つまり、データを利用するセンサノード(シンクノードと呼ぶ)が経路要求を起動する。

消費電力を意識した経路制御の研究の経緯によれば、主に以下の3つの段階を経て、ネットワーク全体のライフタイムを伸ばす技術が検討されてきた。

- ①経路選択のしかたにおいて、データのネゴシエーションと、冗長なデータの削減によってセンサノードの消費する電力を節約する
- ②経路選択時の消費電力を最小にする経路を選ぶ
- ③経路選択時の消費電力を最小化する代わりに、可能な限り長くネットワークが継続して機能することを目的とする

最近の消費電力を意識した経路制御の関連研究の研究アプローチのしかたとしては、大きく3つに分けられる。[Akyildiz2002-1,2]

①提案した経路制御を用いて無線センサネットワーク全体のライフタイムを伸ばす最適制御問題として定式化し、例えば線形計画法のような手法で解こうとするアプローチ。(このアプローチは無線センサネットワーク全体を集中制御するという、現実的には構築できない仮定に基づくが、提案した経路制御の優位性を立証できる。)

②提案した経路制御を実現する個々のセンサノードでのヒューリスティックな制御方法を提案し、より現実的な設計法として提案するアプローチ。(ただし、現状のセンサノードの達成技術では、複雑な経路制御の実装が難しく、実装した評価結果の報告は少ない。)

③上記②の関係で、提案した経路制御の優位性を示すためにシミュレーションを用いるアプローチ。(ただし、シミュレーションなので、網羅的な検証はできないが、提案した経路制御の優位性を示すには十分なアプローチである。)

なお、実験に使えるセンサノードの機能は限定的であり、提案した経路制御を実装するのが難しく、実験によって評価を行うアプローチの研究はあまり発表されていない。(従って、シミュレーションが主流である。)

本研究では主にネットワーク層を中心とする消費電力を意識した経路制御について取り扱うが、ネットワークのライフタイムをより長くする無線センサネットワーク設計のためには、アーキテクチャ上の5つのプロトコル層(物理層、データリンク層、ネットワーク層、トランスポート層、アプリケーション層)のうちネットワーク層以外での研究推進も同時に必要である。主な技術課題を以下に挙げる。[阪田 2006]

- ①センサノードのバッテリー寿命の改善
- ②センサノード間の時刻同期
- ③位置測定
- ④データリンク層で利用する MAC プロトコルの省力化
- ⑤トランスポート層での信頼性の高い通信確保

しかし、本研究では、これらの技術については触れていない。

1. 3 本研究の特徴と概要

本研究では、無線センサネットワークの新しい適用分野で水平展開の可能性の高いアプリケーションとして、「救助活動支援」を取り上げ、そのアプリケーションの本質を見極めた上で、従来の経路制御を改善する方法をについて提案する。ネットワークライフタイムをより伸ばすための改善提案を、flat-based routing と hierarchical-based routing にそれぞれ分類される代表的な従来の経路制御に対してそれぞれ行う。改善効果の評価をシミュレーションで行うことで、改善提案の優位性を明らかにする。特に後者においては、市販のセンサノードを用いて提案方法を実際に構築することを試みることにより、その優位性をよりはっきりさせる。これらの研究を通じて、無線センサネットワークの今後のアプリケーション適用領域を拡大する見通しをたてるだけでなく、センサノードの改善の方向性を明確化し、現実的に使えるレベルにより早く達成することを目指す。

最初に、無線センサネットワーク設計の最大目標である、ネットワークのライフタイムをより長くすることに関して、「ネットワークのライフタイム」の定義を明確にする。本研究で関心を寄せる「救助活動支援」のようなアプリケーションにおいて、ネットワークのライフタイムを、「最初にセンサノードが機能しなくなるまでの時間」と定義するのは相応しくない。センサノードが冗長的に配置されるケースでは、1つのセンサノードが機能しなくなっても代替するセンサノードが機能し、センシングデータをシンクノードに送ることが可能である。そこで、「ネットワークのライフタイム」の定義として「ソースノードからシンクノードへの情報伝達が不能になるまでの時間」を採用する。この定義の下で、flat-based routing に分類される経路制御に対して、消費電力を意識してネットワークライフタイムを最大化するという問題を、新規に最適制御問題として定式化を行う。

次に、無線センサネットワーク内の個々のセンサノードにおいて、独立的な動きの中で経路制御を行う必要があるので、上記のネットワークライフタイムの考え方に基く個々のセンサノードにおけるヒューリスティックな経路選択の制御アルゴリズムを提案する。この提案は、リンクコスト（送受信に伴う消費電力とセンサノードの残バッテリー容量とを結び付けたもの）のみのメトリックを用いた従来の手法に、センサノードの負荷状態を組み合わせた新しいエネルギーメトリックである。この提案が、従来手法に比べてどの程度効果があるかについて、シミュレーションを用いて評価し、有効性を明確化する。

最後に、我々の研究グループが先に発表した、ネットワークライフタイムをより伸ばすための LEACH プロトコルの改良提案に関して、Crossbow 社の MICAz を用いて実際に無線センサネットワークの構築を試み、改善効果を実測し、シミュレーション結果と比較することを試みる。ここで、LEACH プロトコルの改良提案とは、hierarchical-based routing に分類される経路制御の 1 つである LEACH プロトコルにおいて従来活用していなかったメタデータを用いたアグリゲーション機能を新たに追加することで、ネットワークライフタイムを伸ばそうとする提案である。

実際には MICAz の機能不足もあり、所望の経路制御を詳細には構築できないが、MICAz を使って概略動作させた時のバッテリーの電力消費を観測し、シミュレーション結果と比較する。その比較を通じて、シミュレーションのモデル化の問題点、および使用パラメータの問題点などを明確にするとともに、現状の MICAz の課題および消費電力を意識した経路制御実現のための MICAz に代表されるセンサノードの今後の改善点を明確にする。

1. 4 論文の構成

本章では、消費電力指向の無線センサネットワーク制御に関する研究として、消費電力を意識した経路制御に着目し、研究の背景と目的を明らかにし、従来の関連研究を概観するとともに、本研究についての特長を述べた。

2 章では、無線センサネットワークの概念定義とともに、無線センサネットワークの構築技術を概観する。適用するアプリケーションに依存して、無線センサネットワークを構築する上で採用すべきネットワーク制御技術が異なるという特徴がある。そこで、無線センサネットワークを適用するアプリケーションを分類し、将来的に水平展開が期待されるアプリケーションの代表的な例として「救助活動支援」と取り上げ、アプリケーションとしての特長を抽出することで、消費電力を意識した経路制御を中心とするネットワーク制御として新しく必要な要件を明確化する。2. 1 節では、現状の無線センサネットワークの構築技術を概観する。2. 2 節では、本研究の対象である無線センサネットワークのネットワーク制御技術を概観する。2. 3 節では、無線センサネットワークを適用するアプリケーションを分類し、特に将来有望なアプリケーションとして「救助活動支援」について、無線センサネットワークとしての要件をとりまとめ、ネットワーク制御技術として改善すべき点を明らかにする。

3章では、**flat-based routing** に分類される従来の経路制御について改善提案を行う中で、ネットワークライフタイムの新しい定義の提案、および改善提案の実現のための新しいメトリックの提案とシミュレーションによる有効性の確認について述べる。3.1節では、消費電力を意識した経路制御の研究経緯を述べる。3.2節では、消費電力を意識した分散型経路制御アルゴリズムの研究経緯を述べる。3.3節では、最大ネットワークライフタイム指向の経路制御の定式化を提案する。3.4節では、最大ネットワークライフタイム指向の分散型経路制御アルゴリズムを提案する。3.5節では、その提案した分散型経路制御アルゴリズムについて、シミュレーションを用いて改善効果を評価する。

4章では、**hierarchical-based routing** に分類される **LEACH** プロトコルに関して、ネットワークライフタイムをより伸ばすための改良を加えたプロトコルに関して、**Crossbow** 社の **MICAz** を用いて実際に無線センサネットワークの構築を試み、改善効果を実測し、シミュレーション結果との比較について述べる。4.1節では、改良型 **LEACH** プロトコルについて説明する。4.2節では改良型 **LEACH** プロトコルのネットワークライフタイムの伸びについて、シミュレーションと実験の両面から評価し、その結果を比較する。また、比較結果を用いて、**MICAz** の改善箇所を明確にする。

最後に、5章では、本研究を通じての結論と成果についてまとめる。

第2章 無線センサネットワークの構成と適用アプリケーション

無線センサネットワークとは、センシング技術と無線ネットワーク技術を連携させて、複数のセンサノードをネットワークに接続し、センサノード間で何らかの関係付けや同期などを行いながら、センサノード群のまとまりとして、特定あるいは複数の応用に対して必要な機能（例えば、センサノードが感知した情報を伝達・収集したり、センサノード群を制御したりする）を提供する。ネットワークの形態としては、森林や砂漠、都市などに数え切れないほど多くのセンサノードを散布し、環境の様子や変化を知る広域の無線センサネットワークから、工場やビル、家の中にセンサノードを設置する狭域の無線センサネットワークまで多様である。[阪田-2006]

図2-1に無線センサネットワークの概念図を示す。数十メートル四方、あるいは数百メートル四方の領域に、数百〜数千個の安価なセンサノードがばらまかれている（任意にばらまかれる場合と、計画的にばらまかれる場合がある）。このセンサノードは、ある一定距離内に存在する検出ターゲット（検出ターゲットは移動する場合もある）の情報を検出できるセンサ機能を持ち、かつ検出した情報をある一定距離内にあるセンサノードに通信できる機能を持つ。検出された情報は、マルチホップ通信によって（あるいは直接通信によって）、ベースステーション（シンクノードとも呼ぶ）に送られ、蓄積される。利用者は、インターネットなどを介して、ベースステーションにアクセスし、蓄積された情報を所望のアプリケーションによって処理し、所要の情報を入手する。

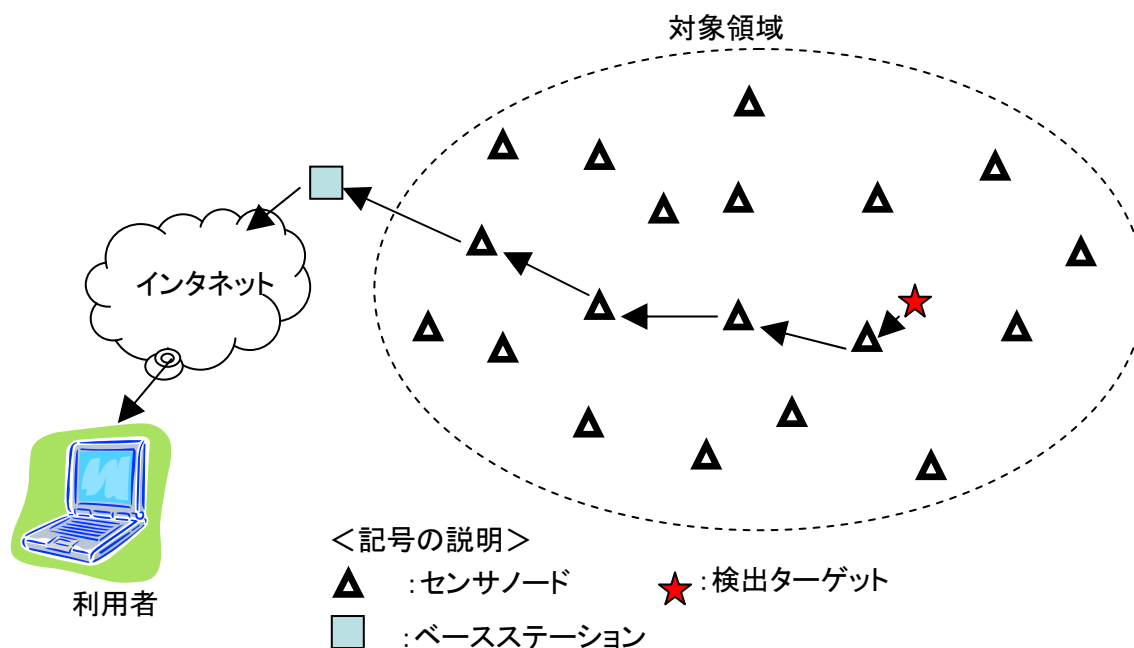


図2-1 無線センサネットワークの概念図

2. 1 無線センサネットワークの構築技術

無線センサネットワークの構築技術は、無線センサネットワークを構成する3つの部分である、①センサノード、②無線ネットワーク、③上位ソフトウェアに分けて考えると、表2-1のように分類される。[総務省 2004] なお、本研究の主な対象は表2-1における無線ネットワークのネットワーク制御技術に関するものである。

以下に、無線センサネットワークを構成する3つの部分について、現状の構築技術を概観する。

表2-1 無線センサネットワークの構築技術

構成部位	構築技術	技術の主な内容
センサノード	センサ	<ul style="list-style-type: none"> ・センサそのものの高精度化、認識率の向上など ・小型化実装（LSI化など） ・計測値の自動キャリブレーション ・いろいろな環境（低温、高温、高湿度、粉塵など）への対応 ・自己メンテナンス
	電源	<ul style="list-style-type: none"> ・省電力化（センサノードを間欠動作させるスリープ制御や、電力消費を一時的に低下させるクロック制御など）
	無線	<ul style="list-style-type: none"> ・センサノード間通信、相互干渉防止
無線ネットワーク	センサノード制御	<ul style="list-style-type: none"> ・センサノードの位置検出 ・センサノード間の時刻同期 ・最適なセンサノード配置 ・大規模なセンサノード管理
	ネットワーク制御	センサノードの消費電力を考慮し、無線センサネットワーク全体の長寿命化を図るための、下記制御技術の改善 <ul style="list-style-type: none"> ・アドホックなネットワーク制御（マルチホップ）（データリンク層、ネットワーク層の経路制御） ・センサノード群から検出情報を収集するシンクノードへのアグリゲーションの制御
上位ソフトウェア	ミドルウェア	<ul style="list-style-type: none"> ・検出情報の処理 ・検出情報の管理、マイニング ・セキュリティ、プライバシー保護
	システム運用	<ul style="list-style-type: none"> ・センサノード、無線ネットワークの遠隔運用保守
	アプリケーション	<ul style="list-style-type: none"> ・アプリケーションの開発環境・開発ツール ・アプリケーション間の連携

2. 1. 1 センサノード

センサノードの構成は通常、図2-2に示すように、センサ部、プロセッサ部、無線の送受信部および電源部（バッテリー）の大きく4つの部分からなる。なお、図2-2において破線で示した、位置検出システム、モビライザ、電力供給部はオプションで付け加わる部分である。[Al-Karaki2004]

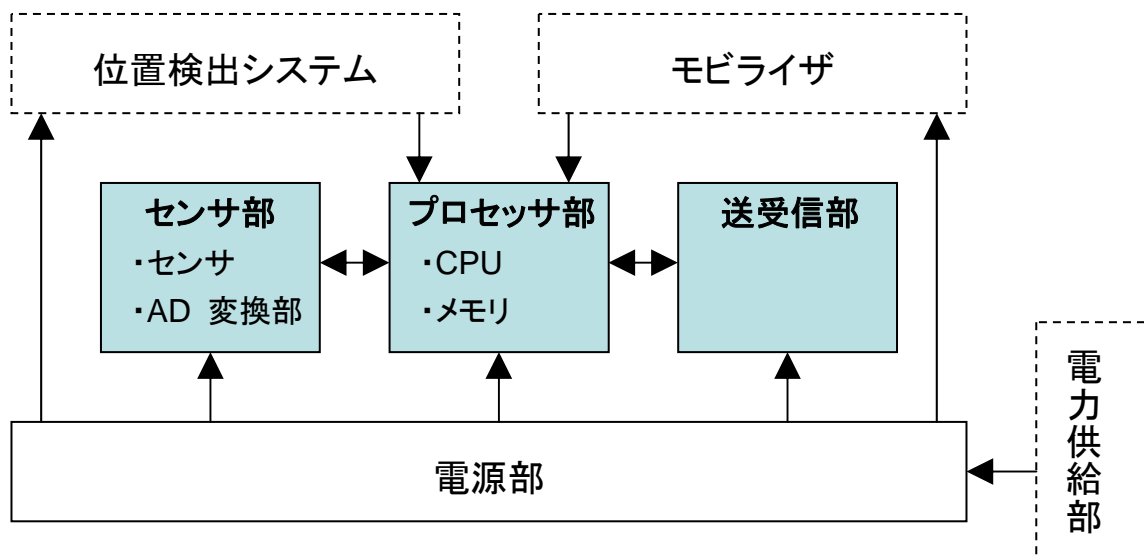


図2-2 センサノードの構成

(1) センサ部

センサ部の主な機能とは、熱、温度、煙、水、音、光、風、振動、加速度などの物理的なアナログ量を検知し、電気的なデジタル量に変換することである。このような物理量だけでなく、化学反応による検知や、人間の五感にあたる検知も可能になってきた。

センサ部の技術課題は、それぞれの検知項目の高精度化、認識率の向上である。検知項目に依らず共通的な課題のひとつ目は、センサ部の消費電力削減である。基本的にセンサノードは最初に設置されると、バッテリーが尽きるまでの期間動作することが多いため、消費電力削減は必須であり、センサ部のLSI化などによる高密度実装[江刺2006][阿波2006]などにより課題を解決しようとしている。ふたつ目の共通的な課題として、センサノードの設置される場所が様々な厳しい環境条件（高温、高湿度、高粉塵など）の場合もあり、さらに設置後にメンテナンスすることはないので、メンテナンスフリー化が重要である。

(2) プロセッサ部

センサノードのプロセッサ部は、主に CPU とメモリで構成されるが、要求条件は消費電力をいかに少なく、一方で処理性能をいかに上げるかという問題に対して LSI の高密度技術を用いて対処するとともに、処理性能向上のため簡易な OS の実現などが課題である。また、センサ部の違いによらず共通的な処理機能の提供も重要な課題である。

(3) 電源部 (バッテリー)

電源部 (バッテリー) 自体の長寿命化がまず課題として挙げられる。(この場合、小型化という全体の制限が付け加わる。) プロセッサ部の制御により、電力消費をいかに押えるかも、技術課題として大きい。例えば、検出可能な期間を時々にして、検出しない期間はセンサノードの動作を止めて、電力消費をなくすスリープ制御や、クロック動作を遅らせる動作クロック制御などが挙げられる。

(4) 送受信部

センサノードの送受信部は、センサノード間の無線区間の物理層における、小型で低消費電力を実現しつつ、かつ距離の四乗に比例して減衰するといわれる厳しい伝搬条件に耐え得る変調方式の実現が課題である。[小川 2006]

2. 1. 2 無線ネットワーク

無線ネットワークにおける技術課題は、大きくセンサノード制御と、ネットワーク制御に分けられる。

(1) センサノード制御

無線センサネットワークを用いたアプリケーションが用いる基本情報とは、各種のセンサによる検出情報とセンサノードの位置情報・時刻情報とのペアである。位置情報・時刻情報は、アプリケーションに依らず共通的に必要となる情報で、センサノード制御としてまとめる。

・位置情報：センサノードに位置検出システム (GPS など) を付加的につけることで、位置情報を入手する方法もあるが、他にも位置を知っているビーコンノードを数箇所に配置することで各センサノードの位置を取得する方法や、基地局との電波伝搬往復時間に基いて測位する方法などの研究が進められている。[Harter1999] [Priyantha2000] [Bahl2000]

[Hightower2002] [Bulusu2000] [He2000]

・時刻情報：センサノードのプロセッサ部に持つ時刻が、時間経過とともに他のセンサノードの時刻とずれるのをいかに防ぐかという時刻同期が課題である。 [Mills1991] [Ganeriwal2002] [Elson2003]

センサノード制御として、これら以外に、センサノードを計画的に配置する場合の配置方法、および、数百～数千個のセンサノードを管理するための管理方法の検討も必要である。

(2) ネットワーク制御

従来のインターネットで事実上標準になっている IP(ネットワーク層)および TCP(トランスポート層)は、有線ネットワークにおけるスループットや遅延対策が最優先するプロトコルスタックとして設計されてきた。これを無線センサネットワークにそのまま適用することは、特にセンサノードを配置しただけで自動的にネットワークを構成する課題と、センサノードの電力消費を考慮しなければならない課題から、難しい。前者の課題については、アドホックネットワークの時代からの研究課題 [Sohrabi2000] [Dam2003] [Li2004] [Tay2004] [Ye2004] [Rhee2005] であり、後者は無線センサネットワーク特有の研究課題である。

本研究では主に後者であるネットワーク層を中心とした「消費電力を意識した経路制御」について検討を進めるが、この観点も含め、無線センサネットワークに適したネットワーク制御法の研究開発が最近盛んになってきている。なお、これらのネットワーク制御技術については、後述の 2. 3 で詳細に述べる。

ここでは、無線センサネットワークの近年の標準化の動きを簡単に概観する。

①無線センサネットワークの位置づけ

IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)の 802 委員会の構成を参考に、その無線区間の通信距離に応じて、以下のように無線を使ったネットワークは分類される。

- ・短距離無線 (数十 c m)
- ・無線 PAN (1 0 – 1 0 0 m) : ZigBee、UWB、Bluetooth など
- ・無線 LAN (約 1 0 0 m) : 802.11b/a/g など
- ・無線 MAN (数百 k m) : (WiMAX Forum)

無線 PAN として代表的な ZigBee は、物理層と MAC 層 (データリンク層) のみ IEEE802.15.4 で規定している。

②ZigBee

無線センサネットワークは上記の分類のうち、無線 PAN および短距離無線の領域にまたがる。無線 PAN の中で、伝送速度=250kbps、利用周波数帯域=2.4GHz/868MHz/915MHz、伝送距離=10-75m、消費電力=60mW 以下（通信時）という特徴を持つ ZigBee のアーキテクチャを図 2-3 に示す。[<http://www.zbsig.org/outline.htm>]

図 2-3 において、物理層と MAC 層（データリンク層）は IEEE802.15.4 を採用しており、ネットワーク層以上は ZigBee Alliance で定義されるプロトコルスタックを用いる。

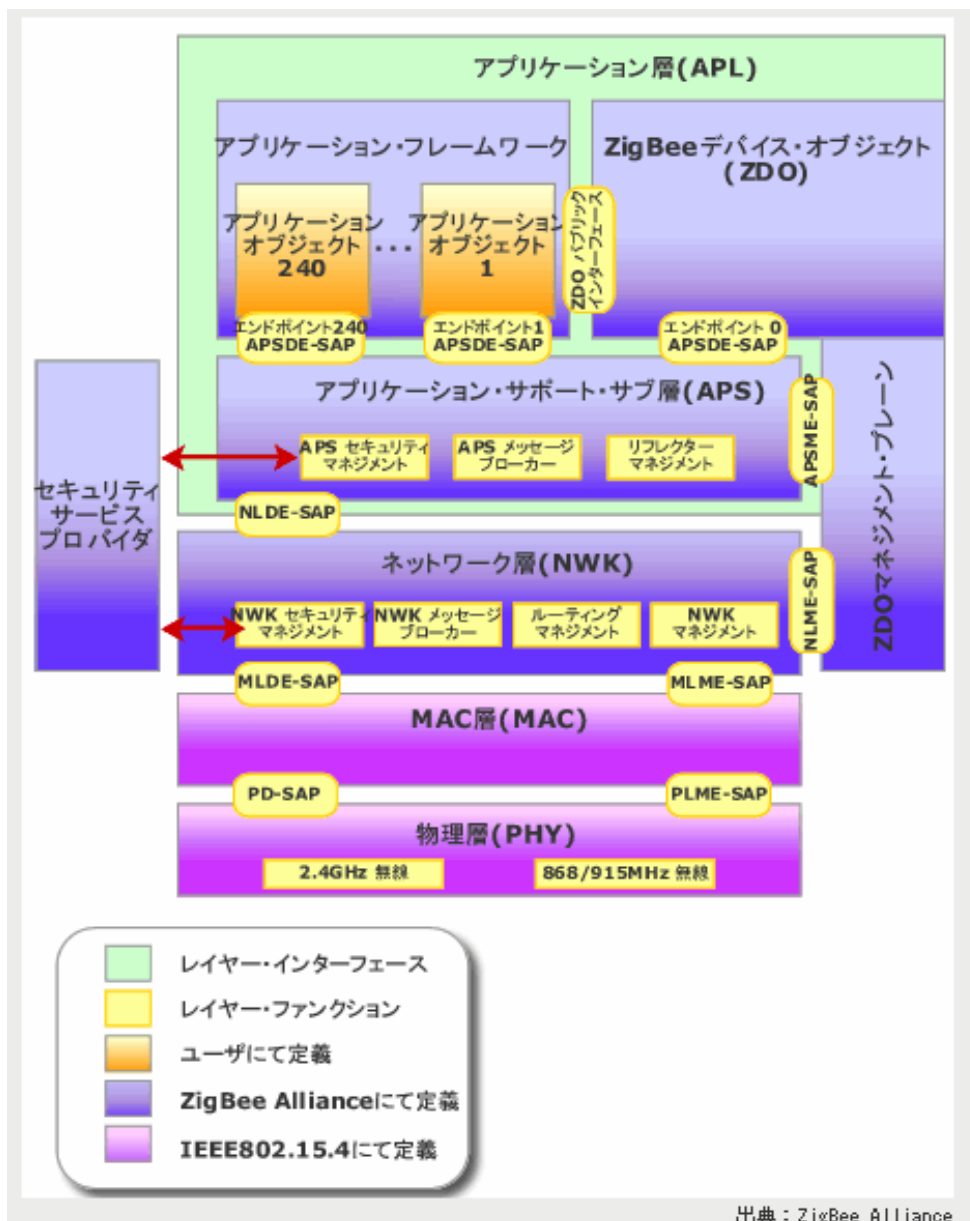


図 2-3 ZigBee のプロトコルスタック

③低速無線PAN IEEE802.15.4a (UWBセンサネットワーク)

無線 PAN の領域において、IEEE802.15.4a として、UWB の低速版で、高精度の測距測位能力を持つ物理層の標準化が進められている。

2. 1. 3 上位ソフトウェア

上位ソフトウェアに関して、センサノード上のミドルウェアとして、検知情報に依らず処理可能にする課題、および検知情報間の重複を排除するとともに、情報を圧縮して、シンクノードに送る処理の課題などがある。一方、図 2-1 におけるベースステーション上での蓄積された検出情報のマイニングなどの処理についての構築技術の研究も必要である。さらに、センサノード全体の運用管理も必要である。最近では、検出情報の情報漏洩対策や、なりすましによる機器制御をガードするセキュリティ機能についての研究が盛んになってきている。[Perrig2004] [Eschenauer2000] [Zhu2004] [Larlof2003] [Wood2002]

2. 1. 4 Crossbow 社 MOTE

研究者が簡単に入手できるセンサノードとして代表的なものは、Crossbow 社 MOTE である。MOTE という名称は、センサネットワークプラットフォーム全体の総称として用いられている。つまり、センサノードのプロセッサ部、送受信部、電源部のハードウェア (MICAz を含む MICA シリーズ)、および各種センサ機能に応じたセンサ部のハードウェア、さらに、プロセッサ部に搭載される TinyOS およびその上で動作する種々のプロトコルスタック群(XMesh など)のソフトウェアに加え、それらの開発環境も合わせた総称である。

本研究で使用する MICAz の諸元を表 2-2 にまとめる。MICAz に搭載される無線通信モジュール CC2420 は、物理層として IEEE802.15.4 に従って 2.4GHz の周波帯を用いているが、MAC 層として一部ソフトウェア実装に依存しているため IEEE802.15.4 をフルサポートしていない。

センサ部は、目的に応じて何種類かのボードが用意されている。ただし、MICAz への接続は 51 ピンあるいは 19 ピン拡張インタフェースコネクタで接続できる。

表 2 - 2 MICAz の諸元

名称		諸元
プロセッサ部	CPU コア	ATMega128L
	クロック周波数(MHz)	7.37
	プログラム用 フラッシュメモリ(KB)	128
	SRAM(KB)	4
拡張インタフェース コネクタ	形式	51 ピン
	10 ビット AD コンバータ	7V・3V 入力
	UART	2
	その他インタフェース	DIO,I2C
送受信部	無線通信モジュール	CC2420
	無線周波数(MHz)	2400
	最大データ転送(kbps)	250
ログ用フラッシュメモリ	容量(KB)	512
電源部	種類	単 3 電池×2

2. 2 無線センサネットワークにおけるネットワーク制御技術

本研究では、無線センサネットワークの主にネットワーク層の、特に経路制御技術に焦点を絞り、研究を進めた。本節では、ネットワーク制御技術について、概観する。

2. 2. 1 無線センサネットワークとアドホックネットワーク

無線センサネットワークのネットワーク制御技術の研究を進めるにあたり、先行して研究開発されたアドホックネットワークの研究結果の流用が多い。そこで、まず無線センサネットワークとアドホックネットワークとの関係を整理する。

アドホックネットワークは、その場限りの通信を行うネットワークであり、ネットワークの形態を表す。一方、無線センサネットワークがセンサノード群を接続した実ネットワークを意味するので、この2つを同一軸で比較することはできない。つまり、無線センサネットワークがアドホックな形態で通信することがありうる。

アドホックネットワークを定義付ける特徴は以下である。[阪田 2006]

- ・ 固定的なネットワークインフラが存在しない
- ・ 集中管理機構がない
- ・ ネットワークトポロジーが頻繁に変化
- ・ マルチホップネットワーク

アドホックネットワークの研究は、1970年代に米国の軍事研究を起源としている。無線センサネットワークの研究は、約10年遅れで始まった。

アドホックネットワークの経路制御に関して、IETF(Internet Engineering Task Force)のMANET(Mobile Ad hoc NETWORK) WGにおいて、2004年までに以下がRFC化された。

<リアクティブ型>：通信頻度が少なく、ネットワークトポロジーの変化が多い場合

AODV(Ad hoc On-demand Distance Vector algorithm)

DSR(Dynamic Source Routing)

<プロアクティブ型>：通信頻度が多く、ネットワークトポロジーの変化が少ない場合

OLSR(Optimized Link State Routing protocol)

TBRPF(Topology Broadcast based on Reverse Path Forwarding routing protocol)

これらの成果は、無線センサネットワークのネットワーク制御技術、特に経路制御の研究

に大きく影響を与えた。

しかし、無線センサネットワークは、アドホックネットワークとの主な違いである次の特徴を持つ。

- ・センサノードの消費電力を意識したネットワークのライフタイム重視である点
- ・検出情報を検出したセンサノードからシンクノードまで運ぶだけの通信である点
- ・センサノードの移動をほとんど考えなくて良い点

これらの特徴を持つ無線センサネットワークのネットワーク層の研究は、アドホックネットワークの研究をベースに独自の方向に進められた。

2. 2. 2 無線センサネットワークのネットワーク層の研究

無線センサネットワークのネットワーク制御として実現すべき主要課題を以下に列挙する。[Al-Karaki2006]

- (1) ランダムに配置されたセンサノード間で、自動的にネットワーク化すること。また、一部のセンサノードがバッテリーを消費してしまい動作不能になり、ネットワークのトポロジー変化があっても、ネットワーク化を維持すること。
- (2) センサノードは小さいため、バッテリー容量に制限がある。バッテリーの電力消費をできる限り抑え、ネットワークライフタイムを伸ばすこと。
- (3) センサノードのプロセッサは、小型化・低消費電力のため、処理能力が大きい。従って、軽い処理の経路制御が必要。
- (4) 複数センサノードをまたがるマルチホップ通信。
- (5) センサノードの一部が故障や、バッテリー不足で動作不能になっても、無線センサネットワーク全体の機能達成に影響を与えないこと。
- (6) 数百～数千のセンサノードを働かせる拡張性。
- (7) データリンク層のプロトコルとの整合。
- (8) トポロジー変化を妨げないセンサノード間の結合。
- (9) 自動ネットワーク化の制御のためのオーバヘッドとそのため電力消費のトレードオフの見極め。
- (10) サービス品質の達成（たとえば、イベント発生後ある時間内にシンクノードに届ける必要があるサービスなど）。

上述の課題をいろいろな側面から解決すべく、無線センサネットワークの経路制御は数多く提案されている。また、これらの経路制御に対して、いろいろな分類のしかたが存在する。代表的なのは、センサノードの構成（アーキテクチャ）がフラットな場合と階層構成の場合で、それぞれ、①flat-based routing、②hierarchical-based routing という括りで呼ぶ。似た観点で、③adaptive-based routing と呼ばれ、すべてのセンサノードがベースステーションになりうる可能性を持つタイプの括りも存在する。一方、プロトコル操作によって、④multipath-based routing、⑤query-based routing、⑥negotiation-based routing という括り方もある。④では、ソースノードとシンクノードの間で複数経路を維持することで、1本の経路で失敗しても、替わりの経路を使える。⑤では、データを必要とするノードがクエリを発出し、そのクエリに合致するデータを送り返す。⑥では、メタデータを用いて、データ転送量を削減する。

これらの①～⑥の括り方は、①と②との間を除き、排他的ではないので、例えばDD(Directed Diffusion) [Intanagonwiwat2003]は、①flat-based routing に分類されるが、⑤query-based routing にも分類される。

以下に、①～③の経路制御の代表例を簡単に説明する。

①flat-based routing

flat-based routing では、すべてのセンサノードが同じ働きをする。

代表的な経路制御として、SAR(Sequential Assignment Routing) [Sohrabi2000]、DD(Directed Diffusion) [Intanagonwiwat2003]、MCFA(Minimum Cost Forwarding Algorithm) [Ye2001]などが挙げられる。

[Braginsky2002] [Chu2002] [Yao2002] [Sadagopan2003]

②hierarchical-based routing

hierarchical-based routing では、センサノードによって異なる働きをする。この考え方は無線ネットワークにおいて最初提案されたもので、高いエネルギーを持つセンサノードはデータの処理と中継を行い、低いエネルギーしか持たないセンサノードはセンシングするという役割分担を行うことで、拡張性と効率的な通信の両方の利点を持つ。

代表的な経路制御として、LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [Heinzelman2000]、PEGASIS(Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) [Lindsey2001,2002]、SMECN(Small Minimum Energy Communication Network)[Rodoplu1999]などが挙げられる。

[Lin1997] [Banerjee2001] [Chatterjee2002] [Bandyopadhyay2003] [Bao2003]
 [Younis2004] [Kamimura2004] [Gober2005] [Ye2005]

③adaptive-based routing

adaptive-based routing では、各センサノードのすべての情報をネットワーク内のすべてのセンサノードに広めるので、その時のネットワークの状態や消費電力の状態に適合するようにシステム全体を制御することが可能になる。

代表的な経路制御として、SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation) [Heinzelman1999]が挙げられる。SPIN は幾度もの改良が重ねられ、SPIN family と呼ばれている。

これらの多種多様な経路制御には、それぞれ一長一短があり適用アプリケーションとの相性もあり比較は難しい。ここでは、敢えて①～③の分類の代表的経路制御の簡単な比較を表 2-3 に示す。[Al-Karaki2006]

表 2-3 代表的な経路制御の比較

	DD (flat-based routing)	LEACH (hierarchical-based routing)	SPIN (adaptive-based routing)
最適経路選択	○	×	×
ネットワークライフタイム	○	◎	○
消費電力への意識	○	○	○
メタデータの利用	○	×	○

(記号の意味) 「◎」はかなり優れている、「○」は優れている、「×」は劣る。

本研究では、従来の経路制御についての各種研究に基き、特に、センサノードのバッテリーの電力消費をできる限り抑え、ネットワークライフタイムを伸ばすことという課題解決に取り組む。

消費電力を意識した経路制御の研究は、その経緯から主に以下の3つの段階を経て、ネットワーク全体のライフタイムを伸ばす技術が検討されてきた。

- ①経路選択のしかたにおいて、データのネゴシエーションと、冗長なデータの削減によってセンサノードの消費する電力を節約する。
- ②経路選択時の消費電力を最小にする経路を選ぶ。
- ③経路選択時の消費電力を最小化する代わりに、可能な限り長くネットワークが継続して機能することを目的とする。

本研究では、上記③の中で、複数の改善提案をするとともに、その効果を評価する。

2. 3 無線センサネットワークの適用アプリケーション

無線センサネットワークの適用アプリケーションは、アプリケーションごとにアーキテクチャが異なるとよく言われる。だからと言って、無線センサネットワークの構築技術としての要件をまとめるのに、個々のアプリケーションごとに検討するのでは効率的ではない。そこで、無線センサネットワーク向けの複数のアプリケーションの特性分析を行うことにより、将来的に特に伸びそうなアプリケーションを絞り込み、さらにそのアプリケーションを深掘することで、無線センサネットワークの構築技術としての要件を明確化し、無線センサネットワークの消費電力を意識した経路制御について研究を進める手法をとる。

2. 3. 1 今後有望なアプリケーション

総務省の2004年の報告の中に[総務省2004]、図2-4に示すユビキタスセンサーネットワークを利用したアプリケーションの具体例を13分野に分けて整理している。

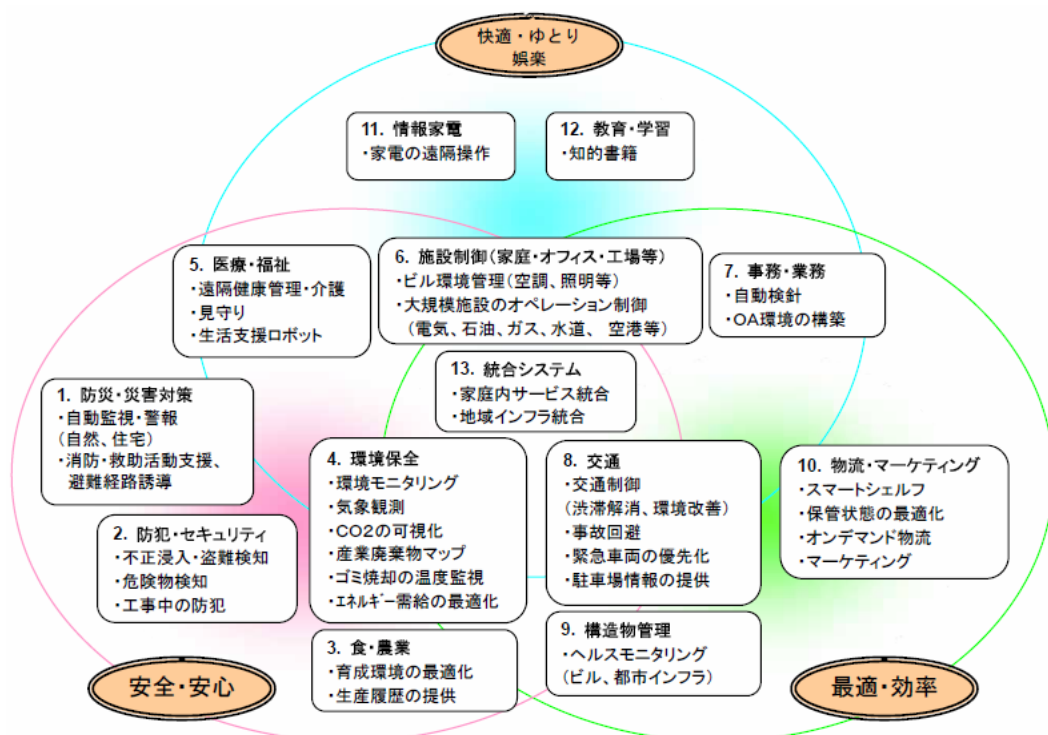


図2-4 ユビキタスセンサーネットワークを利用したアプリケーションの具体例

図2-4では、ユビキタスセンサーネットワークとは、偏在する多くのセンサがオープン型のネットワークを介して接続されると定義されている。本研究の無線センサネットワークとは重複した定義の部分が多いが、ネットワークとして無線を使うことを条件にしておらず、また将来的に広域にわたり配置された異なる種類のセンサノードがオープンなネットワークに接続できることが強調されている点が異なる。特に、前者の違いを意識して、13分野のアプリケーションから、無線センサノードを用いるアプリケーションをまず抽出する。

次に、無線センサネットワークを用いたアプリケーションの特性に関して以下の10項目に絞り、分析を試み、表2-4に整理する。(ただし、図2-1の無線センサネットワークの概念図において、センサノードの検出能力に依存することなく、またベースステーションと利用者の区間に関連する特性を除いて、項目を抽出した。)

<対象領域の大きさ>

①対象領域が無線 PAN の対象とする大きさに近い

<検出情報の取得のしかた>

②すべてのセンサノードで定期的に情報取得する（モニタリング型）／特定のイベント発生を検知しその時に情報取得する（イベント検知型）

③イベント型の検出位置の関係：検出位置があまり変わらない／ターゲットがゆっくり移動する／ランダムに検出位置が変わる

<検出の頻度に伴う情報量>

④検出の頻度が多く、検出情報量が多い／検出情報量が少ない

<検出情報の重要性>

⑤検出情報のベースステーションへの到着の緊急度

⑥検出情報のベースステーションへの到着の確実性

⑦検出情報のセキュリティ要求の大きさ

<センサノードの配置>

⑧事前に計画的に効率的に配置するか／ばらまく

⑨ばらまく場合の、検出エリアの冗長度

<センサノードの電源>

⑩バッテリーを使う場合、交換が可能かどうか

ここで注意すべきは、無線センサネットワークを用いたアプリケーションの特性として、10項目を抽出したが、いわゆるネットワーク層の経路制御を含むプロトコルの構成要素と直接関係する項目に大部分が重複する。このあたりが、無線センサネットワークのアプリケーションごとにアーキテクチャが異なるとよく言われる所以と考える。

表2-4 無線センサネットワーク向けアプリケーションの特性分析

分類	アプリケーション	無線ネットワークが有線ネットワークかの選択(無/有)	①対象領域が無線PANが対象とする大きさに近い(○/×)	②モニタリング型/イベント発生型(モ型/イ型)	③検出位置があまり変わらない/ターゲットがゆっくり移動する/ランダムに検出位置が変わる	④検出情報量が多い/少ない	⑤検出情報のベースステーションへの到着の緊急度(大/小)	⑥検出情報のベースステーションへの到着の確実性(厳しい/ゆるい)	⑦検出情報のセキュリティ要求の大きさ(大/小)	⑧事前に計画的に効率的に配置するか/ばらまく(事前配置/ばらまく)	⑨ばらまく場合の、検出エリアの冗長度(多い/少ない)	⑩電池を使う場合、交換が可能かどうか(不可/可)	特記事項
防災・災害予測	自動監視・警報(自然、住宅)	無	大	モ型(イ型)	(ランダム)	中	中	ゆるい	小	事前配置・ばらまく	—	不可	
	消防・救済活動支援・退避経路誘導	無	○	イ型	ランダム	少ない	中	やや厳しい	小	ばらまく	多い	不可	
防犯・セキュリティ	不正侵入・盗難検知	有・無	○	イ型	ランダム	少ない	大	厳しい	中	事前配置	—	可	
	工事中の防犯	無	○	イ型	ランダム	少ない	大	厳しい	中	事前配置	—	可・不可	
食・農業	育成環境の最適化	有・無	○	モ型	—	中	小	ゆるい	小	事前配置	—	可・不可	
環境保全	環境モニタリング	有・無	大	モ型	—	中	小	ゆるい	小	事前配置・ばらまく	—	可・不可	
	CO2の可視化	有・無	大	モ型	—	中	小	ゆるい	小	事前配置	—	可・不可	
	ゴミ焼却温度の監視	無	小	モ型	—	中	中	やや厳しい	小	ばらまく	少ない	不可	
医療・福祉	見守り	有・無	○	モ型	—	少ない	大	厳しい	大	事前配置	—	可	
施設制御(家庭・オフィス・工場等)	ビル環境管理	有・無	○	モ型	—	多い	大	やや厳しい	中	事前配置	—	可	
	大規模施設オペレーション制御	有・無	○	モ型	—	多い	大	やや厳しい	中	事前配置	—	可	
事務・業務	—												
交通	—												
構造物管理	ヘルスモニタリング(ビル、都市インフラ)	有・無	○	モ型	—	多い	小	ゆるい	中	事前配置	—	可	
物流・マーケティング	保管状態の最適化	有・無	大	モ型	ゆっくり移動	多い	小	厳しい	中	事前配置	—	可	センサがターゲットとともに移動する
情報家電	—												
教育・学習	—												
統合システム	—												

(記号の意味)

- ①について；対象アプリケーションが無線 PAN の適用対象として適切な場合「○」で、不適切な場合「×」。なお、適用対象として適切ではあるものの、無線 PAN の適用対象としてやや領域が大きい場合「大」、やや領域が小さい場合「小」。
- ②について；モニタリング型の場合「モ型」で、イベント発生型の場合「イ型」。なお、副次的な適用の方を括弧書きにしている。
- ③について；上記②においてイベント発生型のケースで、イベントの検出位置があまり変わらない場合「変わらない」、ゆっくり移動する場合「ゆっくり移動」、ランダムに検出位置が変わる場合「ランダム」。なお、上記②においてモニタリング型のケースでは、意味がないので「－」。
- ④について；検出情報量が多い場合「多い」、少ない場合「少ない」、中間的な場合「中」。
- ⑤について；検出情報のベースステーションへの到着の緊急性が高い場合「大」、低い場合「小」、中間的な場合「中」。
- ⑥について；検出情報のベースステーションへの到着の確実性が必要な場合「厳しい」、必要性がない場合「ゆるい」、中間的な場合「やや厳しい」。
- ⑦について；検出情報のセキュリティ要求の強さが大きい場合「大」、ほとんどない場合「小」、中間的な場合「中」。
- ⑧について；センサノードを事前に計画的にかつ効率的に配置する必要がある場合「事前配置」、ばらまく場合「ばらまく」。
- ⑨について；上記⑧において「ばらまく」のケースで、センサノードの検出エリアの冗長性が多い場合「多い」、少ない場合「少ない」。なお、上記⑧において「事前配置」のケースでは、意味がないので「－」。
- ⑩について；センサノードの設置場所の環境制約や効率の面から、電池を交換する場合「可」、交換しない場合「不可」。

上述の表 2-4 において、無線センサネットワークを適用する当面想定できるアプリケーションの特性分析の結果をまとめた。この結果に基づき、将来に向けての無線センサネットワーク向けアプリケーションの方向性について、以下にまとめる。

- ・モニタリング型のアプリケーションが大部分である。しかし、今後はイベント検知型も併せて実現するようになると思う。
- ・センサノードを事前設置できるアプリケーションが大部分である。しかし、最適な事前配置のための設計は難しく、今後、バッテリーの交換が不可なケースには、センサノードが安価になれば、冗長的に多くばらまくケースが多くなると考える。
- ・バッテリーの交換が可能なケースでも、センサノードの数が多く、バッテリー交換工数の多さゆえに、交換しなくなるアプリケーションが増えると思う。
- ・検出情報の到着の緊急度が大きいアプリケーションとは、到着後のアクションまでの時間短縮が必要なケースであり、人命に関わるようなケースがその極端な例である。
- ・検出情報の到着の確実性が厳しいアプリケーションとは、同様に、情報欠落により、人命に関わるようなケースがその極端な例である。
- ・検出情報の到着の確実性が大きいアプリケーションとは、個人情報扱うようなケースがその極端な例である。

以上より、複数のアプリケーションの中から、無線センサネットワークを適用するアプリケーションとして、「救済活動支援」のタイプが将来的に重要性を増すと思われる。

後述の 2.3.2 において、より詳細にこのアプリケーション「救済活動支援」を分析し、無線センサネットワーク構築に対する要件を明確化する。

2. 3. 2 救助活動支援アプリケーション

本節では、救助活動支援のアプリケーションとして、具体的に「災害現場における救助活動」に焦点をあて、その分析を通じて、無線センサネットワークに求められる要件を整理する。

1995年に発生した阪神・淡路大震災(兵庫県南部地震)は、大規模災害現場における課題、とりわけ初動対応における課題を大きくクローズアップした。当時の救出状況の記録によると、災害発生2日目以降の救助者生存率が極めて低くなり、3日(72時間)を過ぎるとほぼ救助率がゼロに近くなることが明らかになっている[兵庫県 1996]。また、この震災では数万人もの生き埋め者が発生したが、電話はほとんど利用できず、救助部隊の連携も十分ではなく、さらには火災など二次災害の危険もあったことから、救助活動は非常に難航した[阪神]。このような状況下において、一人でも多くの被災者を救助するには、如何に迅速かつ広範囲に、被災者やその周囲の状況を把握できるかにかかっている。

このような災害現場における救助活動への利用に焦点を当てた上で、無線センサネットワークに求められる要件を整理する。

<適用モデル>

ここでは、無線センサネットワークを、災害現場において、被災者の有無やその状態、および被災状況や二次災害の危険性に関する情報収集を行うための手段として位置づける。すなわち、初動対応において、被害が大きいか、あるいは被災範囲が広範囲に及び、リソース(人員、インフラ)を十分に確保できない地域に対し、本格的な救助活動を開始するまでの間、必要な情報収集を行うために利用されることを想定する。また、予め事前設置されたインフラとしてではなく、災害発生後に初めて現場に設置されることを想定する。それは以下の理由による。

- ・災害がいつ、どこで起きるのがわからない状況で大量のセンサノードを事前設置するのは、コスト的にも運用的にも現実的でない
- ・事前設置されたセンサノード自体が災害によってダメージを受ける可能性がある

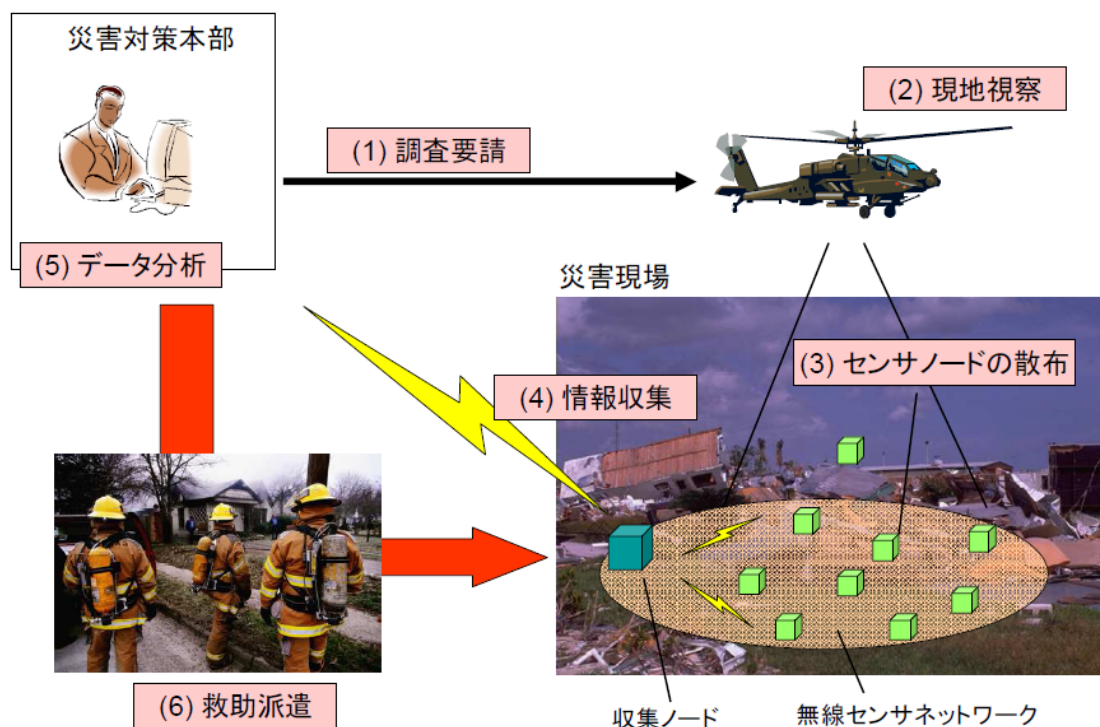


図 2-5 災害現場における無線センサネットワークの利用シーン

想定する利用シーンを図 2-5 に示す。現地災害対策本部が設置され、ヘリコプター等を用いた最初の現場視察が行われた際に、現場の状況から調査あるいは救助活動にすぐに着手できないと判断した場合に、該当地域にセンサノードを設置する。多くの場合、交通手段の遮断や二次災害の危険などから、人手によるセンサノードの設置は困難と予想され、その場合はヘリコプターによる散布設置を行わざるを得ない。さらに、現場の近くに情報収集用のノードを設置（散布）する。情報収集ノードは無線センサネットワークを構成するセンサノードより収集された情報を対策本部へ送信する役割を持つ。これにより、対策本部ではそこで集められた情報をもとに、救助活動計画を検討することができる。

上記利用シーンに基づく無線センサネットワークの構成および設置に関する例を表 2-5 に示す。

表 2-5 災害現場における無線センサネットワークの構成例

搭載センサ	被災者の確認：カメラ，集音マイク，赤外線センサなど 被災状況の確認：カメラ，熱センサ，ガスセンサなど
配置範囲	半径 数 100m 程度
センサ数	数 100～数 1,000 台程度
設置方法	ヘリコプター等による散布 可能であれば人手で設置
稼働時間	最低 3 日間
回収方法	実質回収不可

<無線センサネットワークへの要件>

上述した適用モデルを前提とした場合、無線センサネットワークには以下の機能が要求される。

①センサのライフタイム（バッテリー寿命）

災害での救命率は、発生後 72 時間(3 日間)の初動対応がとりわけ重要である。動員できる救助要員や物資には限りがあり、限られた時間内に被災者を探し出し、かつ救助を行うのは容易ではない。したがって、救助隊員が到着するまで、少なくとも 3 日間は情報を送り続けられる必要がある。

②搭載されるセンサ機能

災害状況の正確な把握と確実な人命救助のためには、単機能のセンサでは限界があり、複数のセンサの組み合わせ、あるいは高音質マイクやビデオカメラといった、得られる情報量の多い機器も併用が必要なシーンが多く想定される。

③センサの設置条件

人命救助を目的とした場合、確実に被災者を発見できるようにするには、高密度（数 m ～数十 m 程度の間隔）でのセンサ設置が必要かもしれない。また、交通手段の遮断や二次

災害の危険により、容易に近づけない災害現場も多く、センサノードを計画的に設置することは事実上不可能である。空中散布するなどして、とにかく置けるだけ置く、といった使い方にせざるをえず、センサノード数も膨大になり、効率的なネットワーク設計は見込めない。

④データ処理

災害現場からは、設置したセンサノードから様々な情報が送られてくることになるが、センサの配置間隔や災害の規模によっては、同一の事象に対して複数のセンサが同時に反応し、似たような情報が大量に送りつけられる可能性がある。それによりネットワークが輻輳する、あるいは災害対策本部でのデータ処理に時間を要する事態になれば、緊急を要する災害救助活動において大きな問題となる。

⑤センサノードの大きさ

ヘリコプターによる空中散布による設置を行わざるを得ないケースもあることから、落下時の衝撃による故障、破損や被災者へのダメージを防ぐために、センサノードはなるべく小型、軽量であることが望まれる。また、一度設置（散布）されたセンサノードは事実上回収不可となる。そのため、環境負荷が小さく、かつ低コストであることも合わせて求められる。

上記で述べた要件には相反するものも多く、全てを同時に解決するのは困難である。例えば、端末を小型化すればバッテリーサイズも小さくなり、ライフタイムが短くなる。また、センサが高機能化し通信量も増えればそれだけ電力消費量も多くなる。

上記を踏まえ、要件を実現するための無線センサネットワークの課題を整理すると、以下の通りとなる。

- ・ 端末の小型化が必要なため、バッテリー容量はあまり大きくできない。一方、高度なセンサを搭載する必要があるため、センサノードの消費電力は大きくならざるを得ず、センサノード全体としての省電力化が必要である。

→要件としては、センサノードに閉じたように思えるが、センサノードは冗長的に配置しているので、単にセンサノードの省電力化だけを考慮するのではなく、むしろネットワーク全体としての持続性をより長くすることを改善する必要がある。

- ・ 比較的狭いエリアに大量のセンサを配置するので、各センサノードが同一イベントに対して検出するので、情報の冗長性が高くなるだけでなく、各センサからのデータ量が大きくなることが想定されることから、データの輻輳が懸念されるため、通信の効率化が必要である。

→無線センサネットワーク内の情報の流れにおいて、冗長データの縮退について改善する必要がある。この改善は、前者の課題である省電力化にもつながる。

以上より、いずれの課題も無線センサネットワークにおける消費電力を意識したネットワーク制御についての新しい改善ポイントであり、第 3 章、第 4 章では、その改善に向けての研究成果を報告する。

第3章 flat-based routing における消費電力を意識した経路制御の研究

無線センサネットワークは、多数のセンサノードからなる。それらのセンサノードは小型化する必要がある、大きなバッテリーを搭載することができないため、無線センサネットワーク全体にとって厳しいエネルギーの制限がある。さらに、センサノードが配置される場所でのバッテリー交換は、その数の多さから現実的でない。従って、無線センサネットワークの潜在力を生かす鍵となる挑戦は、ライフタイムを最大化することである。無線センサネットワークにおいて、消費電力の大きさは、ネットワークのライフタイムに直接影響する要因であり、消費電力を意識したプロトコルが、プロトコルスタックのいずれのレイヤにおいても必要である。

本章ではまず、無線センサネットワーク設計の最大目標がネットワークのライフタイムをより長くすることであるとした場合の「ネットワークのライフタイム」の定義を整理し、見直す。つまり、本研究で関心を寄せる「救助活動支援」のようなアプリケーションにおいて、従来の「ネットワークのライフタイム」が、「最初にセンサノードが機能しなくなるまでの時間」という定義のままでは、当該アプリケーションのようにセンサノードが冗長的に配置されるケースでは当てはまらない。代替するセンサノードが機能する限り、無線センサネットワーク全体としては問題ないので、「ソースノードからシンクノードへの情報伝達が不能になるまでの時間」として改めて定義し直す。この定義の下で、flat-based routing に分類される経路制御について最適制御問題として定式化を新たに行う。

次に、この「ネットワークのライフタイム」の定義に基づき、経路制御を実現する個々のセンサノードでのヒューリスティック的な制御方法に関して、従来のメトリックをうまく組み合わせた新しいメトリックを提案する。この提案の有効性を、シミュレーションにより明確化する。

3. 1 消費電力を意識した経路制御の研究経緯

無線センサネットワークにおける消費電力を意識した経路制御研究の歴史的な流れの中で、センサノードの消費電力をどのように捉えるかの定義のしかたの面から整理する。

その整理結果と比較し、本研究で提案する経路制御研究における消費電力の捉え方の新規性を明確化する。

3. 1. 1 初期のころ

初期のころ、アドホックネットワークの検討をベースに無線センサネットワークの特殊性を考慮して、アドホックネットワークで採用していた経路制御をいかに無線センサネットワークに適用していくかを検討していた時代である。

SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation) [Heinzelman2000]やDD (Directed Diffusion) [Intanagonwiwat2000]の初期のアルゴリズムは、データのネゴシエーションと、冗長なデータの削減によってセンサノードの消費する電力を節約するものであり、消費電力を意識した経路制御研究が本格化する前の時代と考えてよい。

①SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation)について

SPINは、センサノード間でのメタデータの授受によって、すべてのセンサノードに対してセンサデータを効率よく配布することにより、消費電力を減らす。なお、メタデータは、アプリケーションに依存する。

それ以前に用いられた経路制御である classic flooding の問題点：

- ・ **Implosion**：1つのセンサノードから既に届いているデータと同じデータが別パスを介して届く。
- ・ **Overlap**：1つのイベントに対して複数センサノードの検出した複数データが全部届く。
- ・ **Resource blindness**：センサノードが残電力に応じて動作を変えられない。

SPIN が取り入れた対策：

- ・ **Implosion** と **Overlap** とに対して、実際のデータ転送の前に、メタデータを送り合い、「ネゴシエーション」することで、この2つの問題を回避する。
- ・ **Resource blindness** に対して、センサノードが残電力を監視して、動作を変えることを可能にする。例えば、一定以下の残電力になると、動作を控えることを行う。

SPIN のネゴシエーション方法：

- ・ 基本的にすべてのセンサノードに対して、センサデータを効率よく送ることを目的にしている。(分散型ではなく、集中型と呼ばれるのはこのため。センサノードが移動する場合にも対応可能。)
- ・ **ADV stage**：新しくセンサデータを取得したセンサノード A は隣のセンサノードに ADV メッセージ(メタデータ)を送る。ただし、すでに送ったところへは送らない。

- **REQ stage** : ADV メッセージを受け取ったセンサノードは、すでに受け取っているかどうかをチェックし、もし受け取っていなければ **REQ** メッセージ (メタデータ) をセンサノード A に返す。

- **DATA stage** : **REQ** メッセージが返ってきたセンサノードに対して、センサノード A はセンサデータを送る。

基本的にこの3つのステージを、ソースノードからシンクノードに向かって (A から B に向かって)、繰り返し行う。図 3-1 に、SPIN の動作を簡単に説明する。

- (1) センサノード A は隣のセンサノード B に ADV メッセージを送る。
- (2) センサノード B はすでに受け取ったかどうかチェックし、もし受け取っていなければ、センサノード A に REQ メッセージを返す。
- (3) センサデータ A は REQ メッセージが返ってきたセンサノードにみにセンサデータ (DATA)を送る。
- (4) センサノード B は隣のセンサノードに ADV メッセージを送る。
- (5) 隣のセンサノードは (2) と同じ動作で、REQ メッセージをセンサノード B に返す。
- (6) センサノード B は、(3) と同様に REQ メッセージが返ってきたセンサノードにみにセンサデータ (DATA)を送る。

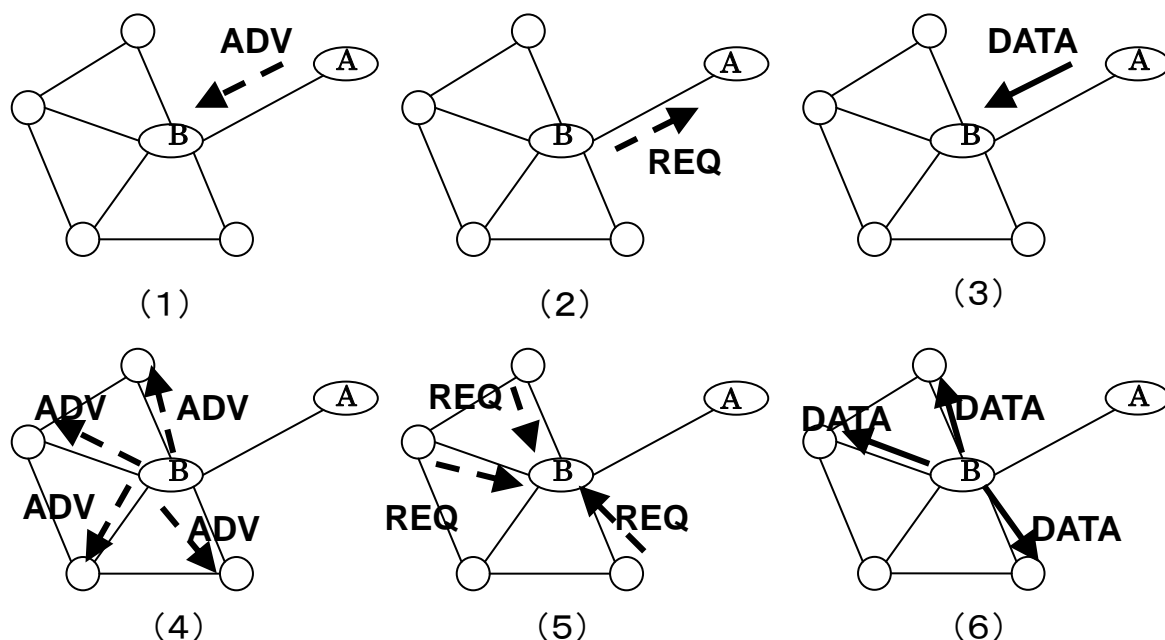


図 3-1 SPIN の動作

②DD (Directed Diffusion) について

Directed Diffusion は、データ集中型で、かつアプリケーション層のしかけである。この点において、SPIN と共通である。SPIN との違いは、メタデータを用いて、複数のソースノードから1つのシンクノードへのルートを見つけ、センスデータをそのルートで送る点である。

センスデータを送るルートの見つけ方：

- (1) シンクノードが隣の複数のセンサノードに向けて「interest」を送信する。それを受けたセンサノードは隣の複数のセンサノード向かって送信する。
- (2) 「interest」を受け取ったセンサノードは「gradient」を返す。
- (3) ソースノードは、「gradient」によって決まるルートで、シンクノードにセンスデータを送る。

なお、定期的にシンクノードは「interest」を送り、「gradient」を更新する。

図3-2に Directed Diffusion の動作を簡単に説明する。

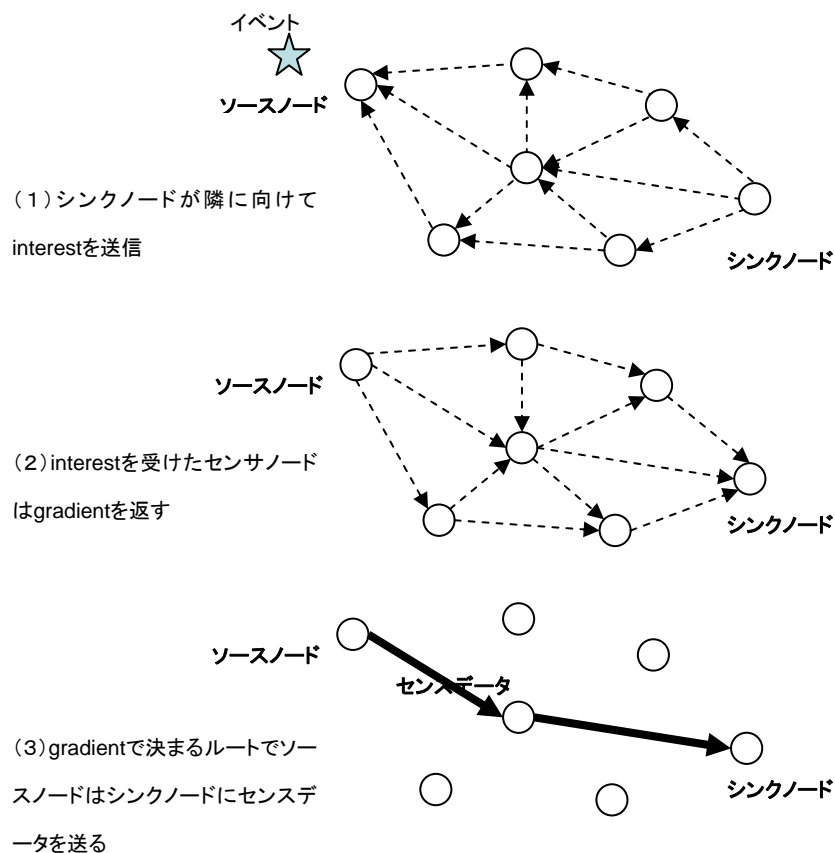


図3-2 Directed Diffusion の動作

SPIN と Directed Diffusion の違い (まとめ) :

- ・ SPIN では、センズデータが発生したソースノードが、最初に問い合わせをかけるのに対して、Directed Diffusion では、シンクノードが最初に (かつ定期的に) 問い合わせをかける。
- ・ Directed Diffusion では、各センサノードがデータアグリゲーション機能やキャッシング機能を保持する。Directed Diffusion は連続的なセンズデータを送るアプリケーションには不向きである。

3. 1. 2 最小消費電力経路制御問題

無線センサネットワークの経路制御に関して、選択すべき経路の消費電力を意識した経路制御を研究したものの代表例であり、先駆けとなった研究として、[Singh1998] [Ettus1998] [Rodoplu1999]が挙げられる。これらの論文における経路制御の目的は、「無線センサネットワーク全体の消費電力の最小化」である。

①[Singh1998]について

消費電力を意識して、センサノードとネットワークのライフタイムを延ばすための無線センサネットワークの経路制御の研究を最初に推し進めたのは[Singh1998]である。特に、経路を決定する上で用いるメトリックについて5種類に分類し比較検討しているが、この詳細は、3. 2. 1で述べる。

[Singh1998]において、シミュレーション分析まで詳細に検討されたメトリックは5つのうち、「パケットあたりの消費電力の最小化」と「パケットあたりのコスト (残電力エネルギーの多いセンサノードをうまく選ぶようにコストを定義) の最小化」の2つである。

②[Ettus1998]について

[Ettus1998]では、「消費電力を最小にする経路」を選択することの有用性を提示している。当時すでに提案されていたminimum transmitted energy(MTE) routingに対して、minimum consumed energy(MCE) routingを提案した。つまり、MTEでは、経路選択基準が、トランシーバの消費電力のみに着目しているが、MCEでは、トランシーバ以外の消費電力も併せた(例えば、各センサノードのCPUでの処理エネルギーなど)上での、最小の消費電力の経路を選択する改善提案である。

③[Rodoplu1999]

[Rodoplu1999]の提案は、flat-based routing の分類ではなく、hierarchical-based routing に分類される。ただし、無線センサネットワーク全体の電力消費を最小化することをねらいに、点在するセンサノードがローカルな領域でトポロジー確認をすることが効果的であることを提案した。

3. 1. 3 最大ネットワークライフタイム経路制御問題

次の時代に入り、経路の消費電力を最小化する代わりに、可能な限り長くネットワークが継続して機能することを目的とするようになる。

上述の3. 1. 2の最小消費電力経路制御について、以下に示すような課題が想定でき、ネットワークを最大限継続して機能させられないケースが簡単に推測される。

「もし全部のトラヒックが最小消費電力の経路を介して目的地へルート化されるなら、その経路を繰り返し使うことで、その経路に沿ったセンサノードのバッテリーがすぐに消費してしまう。この結果、無線センサネットワーク全体としての寿命をあきらかに延ばすことができない。」

このため、最大ネットワークライフタイム経路制御問題として捉えるようになった。

ここで、ライフタイムについてはいろいろな定義が可能である点に注意が必要である。

まず、センサノードのライフタイムと、無線センサネットワークのライフタイムと大きく2つに分けられる。さらに後者は以下のようにさらに2つに分けられる。

a)無線センサネットワークを構成するセンサノードのうち、最初の1つが動作不能になるまでの時間

b)ソースノードからシンクノードへの情報伝達が不能になるまでの時間

上記 a)か b)のいずれを採用するかは、無線センサネットワークを適用するアプリケーションに依存して決まる。つまり、センサノードすべての情報が必要になるクリティカルなアプリケーションの場合、a)を適用するが、本研究で関心を持った「救助活動支援」のようなアプリケーションでは、b)を適用するのが相応しい。

①[Chang1999] [Chang2000] [Chang2004]について

[Chang1999]では、以下の条件でのバッテリーの電力消費の面から無線センサネットワークのライフタイムを最大化する問題を線形計画法で解ける最適制御問題として定式化した。なお、[Chang1999]ではライフタイムを上記 a) の無線センサネットワークの最初に1つのセンサノードが動作不能になるまでの時間として定義していた。[Chang1999]における前提条件は以下である。

- ・センサノードが移動しない
- ・ソースノードが1つで、一定の比率で情報を生成する
- ・シンクノードが1つ

これらの前提条件下で、ライフタイムを最大化するためには、センサノードの残電力エネルギーに応じて消費電力をバランスさせる経路選択が、従来の消費電力を最小にする経路選択より優れていることを示した。

[Chang2000]では、[Chang1999]の前提条件を拡張し、複数のソースノードおよびシンクノードにおいても、最適制御問題として定式化した。

[Chang2004]では、[Chang1999] [Chang2000]においてソースノードが一定の比率で情報を生成するケースだけを想定したのに対して、ある任意の情報生成過程のケースについても、最適制御問題として定式化した。

②[Zussman2002]について

[Zussman2002]では、[Chang2000]を拡張し、センサノードが制限されたバンド幅で、かつ制限されたバッテリーエネルギーのときに無線ネットワークのライフタイムを最大化する線形計画法の問題として定式化し、それを解く分散繰り返しアルゴリズムを提案した。なお、[Chang2000]をベースにしているので、ライフタイムは無線センサネットワークの最初に1つのセンサノードが動作不能になるまでの時間として定義していた。

③[Bhardwaj2002]について

[Bhardwaj2002]では、あるセンサノードでのデータアグリゲーションが可能なケースで、ネットワークライフタイムの限界を取得する問題を扱った。ここで、ライフタイムを以下のように2つに定義し、特に後者の定義に基づきをライフタイムの最大値（限界）を議論した。

- ・ミッションクリティカルでないアプリケーションでは、ライフタイムを無線センサネットワークがアクティブである時間の累積と定義している。ここで、無線センサネットワー

クがアクティブとは、ソースノードがソース（このソースは情報発信を連続的に行い、移動することを想定している）からの情報を検知し、その情報が指定されたレベルでシンクノードに届くことを意味する。

・一方、ミッションクリティカルなアプリケーションでは、ライフタイムを最初にアクティブでなくなるまでの時間と定義している。

3. 1. 4 本研究の新規性

無線センサネットワークにおける消費電力を意識した経路制御研究の歴史的な流れの中で、消費電力をどういう面から捉えるかの定義のしかたに関して、本研究では、以下の点での新規性を目指した。

本研究では、上述の3. 1. 3のように、「最大ネットワークライフタイム経路制御問題」として捉えるが、ネットワークライフタイムの定義のうち従来あまり研究対象にならなかった、「b)ソースノードからシンクノードへの情報伝達が不能になるまでの時間」という面から、ネットワークライフタイムを最大化する問題を最適制御問題として定式化することに挑む。

この観点からの検討結果について、3. 3において詳細に述べる。

3. 2 消費電力を意識した分散型経路制御アルゴリズムの研究経緯

無線センサネットワークにおける消費電力を意識した経路制御研究の歴史的な流れの中で、ネットワークライフタイムをどういう面から捉えるかの定義のしかたについての整理は、3. 1 で述べた。本節では、上述の3. 1 の捉え方に基づいて、実際に各センサノードで経路制御を行うアルゴリズムという面から、過去の研究を振り返り、本研究の新規性を明確化する。

無線センサネットワークは、一般的に広域にセンサノードが配置されるので、全センサノードの経路制御を集中的に制御することは、常識的ではなく、いかに各センサノードで分散して動作できるアルゴリズムを確立するかが、重要なテーマである。加えて、アルゴリズムの制御オーバーヘッドは、センサノードのバッテリーに負担をかけないように軽くしなければならない。

3. 2. 1 無線センサネットワークにおけるエネルギーメトリックの研究の歴史

経路を評価するエネルギーメトリックは、分散型経路制御アルゴリズムの要素として重要である。無線センサネットワークに関してのエネルギーメトリックの主な研究は以下の通りである。

[Singh1998]において、Singh らはアドホックネットワークにおける消費電力を意識した経路選択の5種類の異なるメトリックを検討した。

アドホックネットワークにおける分散型準最適最大化ライフタイム経路制御アルゴリズムとして、最初に[Chang2000]で、ヒューリスティックな分散アルゴリズムが提案された。この提案における前提は、純粋な経路制御を扱うことと、中間のセンサノードでデータアグリゲーションを可能としないことである。さらに、[Chang2004]で、この拡張提案が行われた。

[Shah2002]では、リンクコストに反比例して確率的に次のホップノードを見つけ出す提案を行った。

[Michail2003]では、アドホックネットワークにおいてコネクション型のトラヒックの経路制御問題を扱い、十分なバンド幅と通信リソースにおけるエンドーエンドのユニキャストパスを決定するために、いくつかのヒューリスティックなアルゴリズムが提案された。

[Aslam2003]では、無線センサネットワークに対する消費電力を意識した3つの経路制御アルゴリズムを提案した。

①[Singh1998]について

それまで提案されていたのは、shortest-hop routing、つまり、ホップ数を最小化するメトリックであった。[Singh1998]において、新たに消費電力を意識した5つのメトリックが提案された。ただし、定式化できているのは、(A) と (D) の2つである。

(A) Minimize Energy consumed/packet

- ・パケットあたりの消費エネルギーを最小化するメトリック。
- ・パケット j がソースノードである n_i から、シンクノードである n_k まで転送されると仮定すると、パケット j の消費エネルギー e_j は以下の式で表わされる。

$$e_j = \sum_{i=1}^{k-1} P(n_i, n_{i+1})$$

ここで、 $P(a,b)$ はセンサノード a から b への送受信での電力消費量。

このメトリックの目的は以下のとおりとなる。

$$\text{Minimize } e_j, \forall \text{ packets } j$$

- ・ネットワークのライフタイムを延ばすには明らかに適切でない提案である。何故なら、パケットあたりで最小の消費エネルギーを選択すると、1つのセンサノードを必ず選択する場合にそのセンサノードのバッテリーの電力エネルギーが最初に消耗してしまうのは明白だからである。

(B) Maximize Time to Network Partition

- ・ネットワークを分断させないようにすることを重要視するメトリック。(ミッションクリティカルなアプリケーション向け。)
- ・定式化を表現できていない。

(C) Minimize Variance in node power levels

- ・すべてのセンサノードの残電力エネルギーを同じぐらいにして、できる限り長く全部のセンサノードが動作し続けることを目的とするメトリック。
- ・定式化を表現できていない。
- ・レスポンスを最小化する一方で、それぞれの仕事量を同じにする分散処理システムの負荷分散に似る。

(D) Minimize Cost/ Packet

- ・パケットを送るにあたり、残電力エネルギーの多いセンサノードをうまく選ぶメトリック

ク。

・ x_i はセンサノード i におけるそれまでに消費されたトータルの電力エネルギーを表す。
 $w_i(x_i)$ は x_i の単調増加関数で表わされたセンサノード i のノードコストである。このとき、
パケット j がソースノードである n_i から、シンクノードである n_k まで転送されると仮定すると、
パケット j のコスト C_j を以下の式で表わす。

$$C_j = \sum_{i=1}^{k-1} w_i(x_i)$$

このメトリックの目的は以下のとおりとなる。

Minimize $C_j, \forall \text{packets } j$

・ ネットワークの競合によってコスト増になるが、この考えを組み入れられる。

(E) Minimize Maximum Node Cost

・ センサノードにおいて、時間軸上でパケットが平均的に流れるようにするメトリック。
・ $C_i(t)$ は時刻 t におけるセンサノード i を通過するパケットのコスト。 $\hat{C}(t)$ は $C_i(t)$ の中の最大値。このメトリックの目的は以下のとおりとなる。

Minimize $\hat{C}(t), \forall t > 0$

・ 定式化を表現できていない。

②[Chang2000] [Chang2004]について

[Chang2000] [Chang2004]では、ライフタイムを最大化するためには、センサノードの残電力エネルギーに応じて消費電力をバランスさせる経路選択を実現するためのヒューリスティックな FA アルゴリズム(flow augmentation algorithm)を提案している。これは、[Singh1998]で別々に扱っていたメトリックを関係付け、ひとつにしたメトリックを提案している。

[Chang2004]で提案されたメトリックは以下の式である。時間的に最初のところ、センサノードのバッテリーは十分に電力エネルギーがあるのでトータルの消費エネルギーが最小のパスを選び、時間経過とともにバッテリーの電力エネルギーがなくなるにつれて、残電力エネルギーの少ないセンサノードを避けるパスを選ぶのがよいということ、以下のメトリック C_{ij} は表現している。

$$C_{ij} = (e_{ij}^t)^{\alpha_1} (\hat{E}_i)^{-\alpha_2} (E_i)^{\alpha_3} + (e_{ij}^r)^{\alpha_1} (\hat{E}_j)^{-\alpha_2} (E_j)^{\alpha_3}$$

ここで、リンク(i, j)間の単位データ転送ためのエネルギー消費を e_{ij}^t (送信側) と e_{ij}^r 、(受信側)、さらにセンサノード i, j のそれぞれのバッテリーの初期電力エネルギー E_i と E_j 、残電力エネルギー \hat{E}_i と \hat{E}_j とする。なお、 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 、 $\alpha 3$ は重み付けのパラメータ (負でない整数) である。

あるインターバルの最初にシンクノードとソースノードを結ぶパスの各リンクのメトリックをすべて計算しておき、そのインターバルの間は、メトリックの和が最も小さいパスを用いる。

③[Shah2002]について

メトリックとしては[Chang2000]の提案を変形し、以下のリンクコストを用いる。

$$C_{ij} = (e_{ij})^{\alpha 1} (\hat{E}_i \div E_i)^{\alpha 2}$$

ここで、リンク(i, j)間の単位データ転送ためのエネルギー消費を e_{ij} 、センサノード i のバッテリーの初期電力エネルギー E_i 、残電力エネルギー \hat{E}_i とする。なお、センサノード i がシンクノードに近く、センサノード j がソースノードに近いとする。また $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ は重み付けのパラメータ (負でない整数) である。

センサノード j にとっての、センサノード i のコスト C_{N_j, N_i} は、次の式で表わす。

$$C_{N_j, N_i} = Cost(N_i) + C_{ij}$$

このコスト C_{N_j, N_i} の逆数を正規化して、センサノード j がセンサノード i を経路選択する確率として用いる。

3. 2. 2 本研究の新規性

無線センサネットワークにおける消費電力を意識した経路制御研究の歴史的な流れの中で、エネルギーメトリックに関して、本論文では、以下の点での新規性を目指した。

「ソースノードからシンクノードへの情報伝達が不能になるまでの時間」という定義のネットワークライフタイムを最大化することを目指し、エネルギーメトリックとして、[Chang2004]を改善した提案を行い、さらにシミュレーションによって[Chang2004]に比較してその効果の大きいことを明らかにした。

この検討結果について、3. 4において詳細に述べる。

3. 3 最大ネットワークライフタイム指向の経路制御の定式化の提案

無線センサネットワークを無向グラフ $G=(N,L)$ でモデル化してみる、ここで N はすべてのセンサノードの集合で、 L はすべてのリンク (i,j) 、ただし、ここで i と j は N に属する。 j が S_i に所属するときのみリンク (i,j) が存在する、ただし、ここで S_i はある転送電力レベルでノード i によって直接届くすべてのセンサノードの集合である。

無線センサネットワークのすべてのセンサノードのデータパケットの最終的な到着場所は、シンクノード(sn)であり、シンクノードは検出エリアの外に置かれることもあり、あるいは領域内のこともある。

各センサノード i は初期エネルギー E_i を持つ。センサノード i で消費される単位データを隣のセンサノード k への送信のためのエネルギーを e'_{ik} と記述する、また隣のセンサノード j からの単位データを受信するためのエネルギーを e''_{ji} と記述する、ここでセンサノード i の受信によって消費されるエネルギーを e' として略す。

さらに、本研究では、受信による消費エネルギーが無視できないことから、たとえ数個のセンサノードが同じデータパケットを受信可能であっても、ただひとつのセンサノードが全パケットを受け取りフォワードすると仮定した。他のセンサノードはスリープモードに入るか、他の隣のセンサノードと通信するものと仮定した。

f_{ik} は、センサノード i のライフタイムの間におけるセンサノード i からセンサノード k への単位時間あたりの転送量とする。

以下で議論する上でのセンサノード i, j, k の関係を図 3-3 に示す。

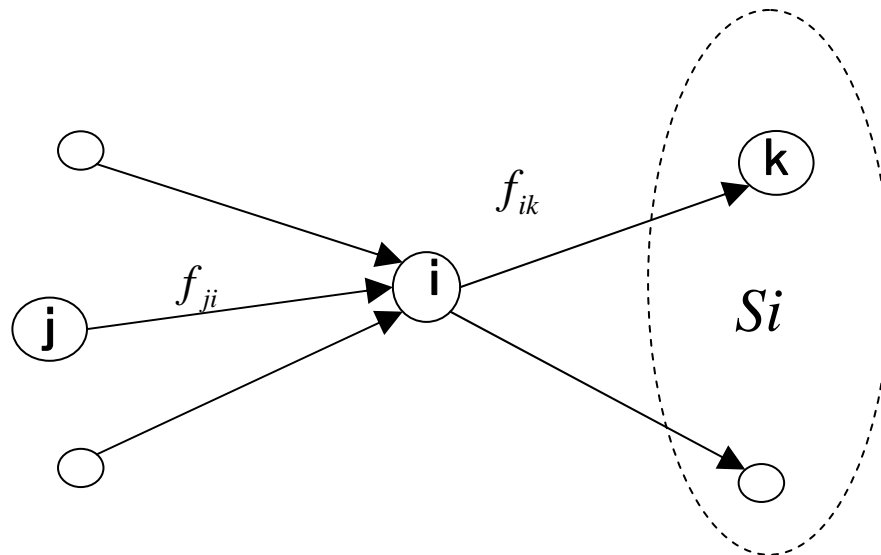


図 3-3 センサノード i, j, k の関係

まず、以下のように定義する。

定義1: 与えられた $f = \{f_{ij}\}$ の下でのセンサノード i のライフタイム T_i を (3-1) 式で表す。

$$T_i(f) = \frac{E_i}{\sum_{k \in S_i} e^t f_{ik} + \sum_{j: i \in S_j} e^r f_{ji}} \quad (3-1) \text{ 式}$$

定義2: センサノード i のライフタイムの分散 (ダイバーシティ) Δ_i を (3-2) 式で表す。

$$\Delta_i = \left(\frac{\sum_{i \in N - \{sn\}} T_i(f)}{|N - \{sn\}|} - T_i(f) \right)^2 \quad (3-2) \text{ 式}$$

定義3: 与えられた $f = \{f_{ij}\}$ の下でのセンサノードのライフタイムの分散 Δ を (3-3) で表す。

$$\Delta = \max_{i \in N - \{sn\}} \Delta_i \quad (3-3) \text{ 式}$$

上記定義に基き、無線センサネットワークのライフタイムの定義を以下に述べる。

通常、アドホックネットワークのライフタイムは通常最初のバッテリーが放電してしまうまでの時間と定義され、また無線センサネットワークのライフタイムは最後のセンサノードが停止してしまうまでの時間と定義されることが多い。しかし、両方とも無線センサネットワークに対して適切でないと考える。無線センサネットワークのセンサノードの密度は、アドホックネットワークのそれより高いので、いくつかのセンサノードが停止した後も、ネットワークは普通に機能する。一方、停止したセンサノードの数がネットワークの大部分を占めるときネットワークは不能になる。従って、本研究では、パケット収集を最初に失敗するまでの時間をネットワークライフタイムと定義する。

Tmin と **Tmax** をセンサノードの最小・最大ライフタイムとする。従って、ネットワークライフタイムは **Tmin** と **Tmax** の間の値になる。

消費電力を意識した経路制御アルゴリズムの目的は、ネットワークライフタイムを最大化するためのリンクフロー f_{ij} を取得することである。

直感的に考えて、すべてのセンサノードができる限り長く働くことを保証することが重要である。つまり、(3-3) 式を最小にするリンクフロー f_{ij} が取得すべき解である。従って、

ネットワークライフタイムを最大化する問題は以下のように定義される。

$$f : \inf_f \Delta = \inf_f \left\{ \max_{i \in N - \{sn\}} \Delta_i \right\} \quad (3-4) \text{ 式}$$

センサノード i によって生成される情報 Q_i は、いくつかの仲介センサを介してルート化され、シンクノードに至る。この Q_i も考慮して、無線センサネットワークのライフタイム（パケット収集を最初に失敗するまでの時間と定義する）を最大化するための最適化制御問題は、以下のように定式化でき、その解答である $f(t)$ が求めるものである。

与えられる条件： トポロジーと要求条件($Q_i(t)$)

目的関数： センサノードのライフタイムの分散 Δ を最小化

制約条件：

$$f_{ij}(t) \geq 0, \forall i \in N - \{sn\}, \forall j \in S_i, \forall (i, j) \in L \quad (3-5) \text{ 式}$$

$$\sum_{j \in S_j} f_{ji}(t) + Q_i(t) = \sum_{k \in S_i} f_{ik}(t), \forall i \in N - \{sn\} \quad (3-6) \text{ 式}$$

$$\Delta = \max_{i \in N - \{sn\}} \left(\frac{\sum_{i \in N - \{sn\}} T_i(f)}{|N - \{sn\}|} - T_i(f) \right)^2 \quad (3-7) \text{ 式}$$

3. 4. 最大ネットワークライフタイム指向の分散型経路制御アルゴリズムの提案

本研究では、経路制御に対して消費電力を意識したメトリックを使ってネットワークライフタイムを増加させる課題を扱っているが、重要な点は、パケット収集を最初に失敗するまでの時間をネットワークライフタイムと定義していることである。つまり、定性的なモチベーションは以下である。

- ・無線センサネットワークのネットワーク生存性を増加させることが目的なので、選択したパスの電力消費の少なさという面では準最適なパスを時々使う。
- ・最適なパスが枯渇しないようにする。
- ・ネットワークが分割されてしまうより、全体としてネットワークがゆっくり劣化するようにする。

経路を評価するのに使うメトリックは、経路制御プロトコルを実現する上で重要な要素である。経路を使う通信コスト、経路に沿ったセンサノードの残電力などの情報をメトリックは含む。

従来の無線センサネットワークの消費電力を意識した最近のアルゴリズムの多くは、消費電力と通信コストを1つのメトリックにしたリンクコスト C_{ij} に基いて、経路制御を導いている。

軽い負荷のセンサノードを通過する経路制御パケットは、競合によるエネルギー消費がより少ないので、エネルギーを保持しやすくなる。この点に着目し、本研究で提案するエネルギーを考慮した経路制御プロトコルでは、次のホップを選択する関数に、リンクコスト C_{ij} と負荷 L_j とを関連付けるように考えた。

C_{ij} を計算するには、リンク(i,j)間の単位データ転送のエネルギー消費である e_{ij}^t と e_{ij}^r 、初期エネルギー E_i と E_j 、残エネルギー \hat{E}_i と \hat{E}_j のパラメータを用いる。本研究では、3. 2. 1 ですでに説明した、[Chang2004]で提案されたリンクコスト計算関数を使う。

$$C_{ij} = (e_{ij}^t)^{\alpha_1} (\hat{E}_i)^{-\alpha_2} (E_i)^{\alpha_3} + (e_{ij}^r)^{\alpha_1} (\hat{E}_j)^{-\alpha_2} (E_j)^{\alpha_3} \quad (3-8) \text{ 式}$$

そして、ノード j に対する NRW (node relay willingness) と呼ばれる次のホップ選択関数を以下のように定義する。

$$NRW_{ij} = C_{ij} \cdot f(L_j) \quad (3-9) \text{ 式}$$

ここで、 $f(L_j)$ は L_j の関数である。本研究では、単純さから e を使う。

$$NRW_{ij} = C_{ij} \exp(L_j) \quad (3-10) \text{ 式}$$

本研究では、情報収集のフェーズでデータアグリゲーションが実行されると仮定する、つまり、イベント発生時にその対象領域内の複数のセンサノードが検知し、ソースノードになる可能性のあるケースにおいて、対象領域のただ 1 つのセンサノードがソースノードに選ばれと仮定する。そのソースノードはまた対象領域のアグリゲータとみなされ、情報はここでアグリゲートされる。いかにソースノードを選び、対象領域で情報をいかにアグリゲートするかは、本研究の研究対象の外である。従って、一般性を失うことなく、問題を簡略化するために、ソースノードとして対象領域の 1 つのセンサノードを無作為に選ぶ。

本研究で提案する消費電力を意識した経路制御アルゴリズムは、リアクティブ型の経路制御プロトコルに分類される。つまり、シンクノードがルート要求を最初に起動するプロトコルである (Directed Diffusion と同じ)。以下に、本研究で新規提案した NRW を用いたファワーディング表の決定の動作を簡単に説明する。

シンクノードは、ソースノードの方向に「interest」を示すコネクションを起動する。シンクノードは「interest」を送る前にパスコスト値と負荷値をゼロに初期化する。

各仲介センサノードは「interest」をソースノードにより近い隣のセンサノードにフォワードする。「interest」を受けた仲介センサノードは、隣のセンサノードの NRW (node relay willingness) を計算し、受信した「interest」のコスト領域から読み取れた隣のセンサノードのパスコストにそれを加算する。もし、センサノード j がセンサノード i からの「interest」を受信するなら、以下のようにパスコストを計算する。

$$Cost_{ji} = Cost(i) + NRW_{ji} \quad (3-11) \text{ 式}$$

もし、センサノード j が (S_j に属する) 隣の複数のセンサノード i から「interest」を受信する場合、それぞれのセンサノードからの「interest」を受けるときに式 (1 1) のパスコストを計算し、その最小値をセンサノード j のパスコストとして設定する。

$$Cost(j) = \min_{i \in S_j} (Cost_{ji}) \quad (3-12) \text{ 式}$$

ここで、 S_j はセンサノード j の隣のセンサノードの集合を示す。

センサノード j は (3-12) 式に従い、最小のパスコストを持つ隣のセンサノード i を選択し、ソースノードからシンクノードへのデータパケットの中継に対して次のホップノードとして、フォワーディング表にこのセンサノード i を書き込む。もし、1つ以上の隣のセンサノードが同じ最小パスコストならば、センサノード j は次のホップノードを無作為にその中から1つ選び、選んだセンサノードをフォワーディング表に書き込む。

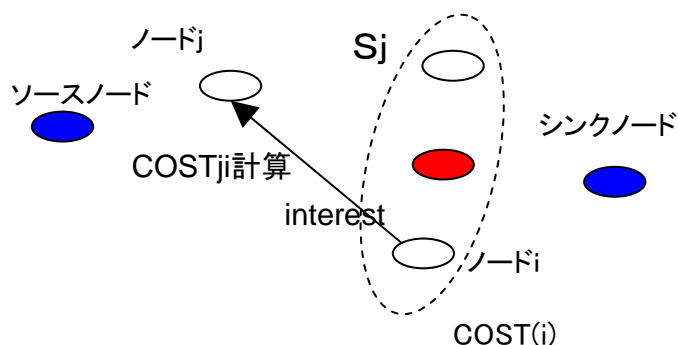
ここまでの動作について、 S_j にセンサノード i 、 k 、 m が属する場合のセンサノード j のフォワーディング表の決定の動作例を図 3-4 に簡単に説明する。

さらに、センサノード j は、ソースノードの方向の隣のセンサノードに向かって「interest」を送る動作を繰り返す。このプロセスは、ソースノードが隣のセンサノードから「interest」を受信するまで続けられる。

データパケットの転送フェーズでは、ソースノードは、対象の要求に応じてフォワーディング表に基いた隣のセンサノードにデータパケットを転送する。また、各中継センサノードはフォワーディング表における隣のセンサノードにデータパケットを送信する。このプロセスはデータパケットがシンクノードに届くまで続ける。

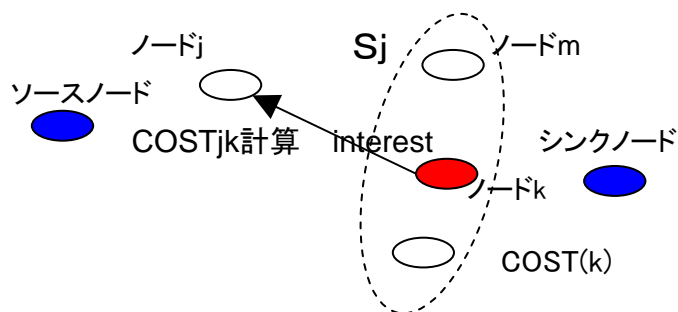
一定時間の間、このフォワーディング表に基きデータパケットを転送するが、一定時間経過後に、シンクノードからの「interest」を送るという上記動作を繰り返し、フォワーディング表を書き換える。

ステップ (1)



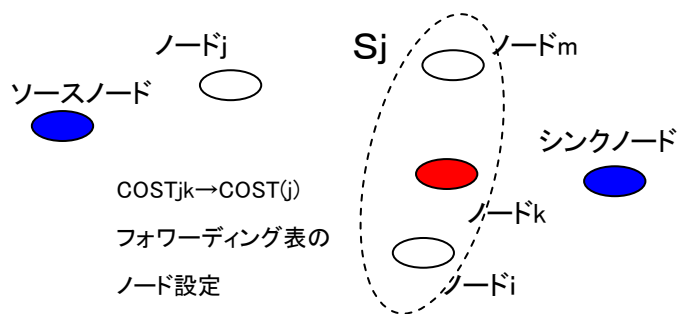
(1-1) センサノード j は、 S_j に属するセンサノード i から **interest** を受ける。*1
 (1-2) センサノード j は **Interest** と一緒にセンサノード i に関する、 $COST(i)$ と (E_i) と \hat{E}_i と L_i を受け取り、 $COST_{ji}$ を計算する。

ステップ (2) (3)



(2-1) センサノード k からの **interest** を受けると、同様にセンサノード j は $COST_{jk}$ を計算する。
 (3-1) センサノード m についても同様にセンサノード j は $COST_{jm}$ を計算する。

ステップ (4)



(4-1) センサノード j は、 $COST_{ji}$ と $COST_{jk}$ と $COST_{jm}$ を比較し、一番小さい $COST_{jk}$ を $COST(j)$ として設定する。
 (4-2) センサノード j はフォワーディング表に、センサノード k を登録する。

(* 1 の補足説明) **interest** を受けたセンサノードの対しては常に **gradient** を返す。

図 3-4 S_j にセンサノード i 、 k 、 m が属する場合のセンサノード j の
 ファワーディング表の決定の動作例

3. 5 シミュレーション評価

シミュレーションによって、上述の 3. 4 で新しく提案した NRW (node relay willingness) というメトリックスを用いた経路制御 (R_NRW) と、リンクコストのみをメトリックスに用いた経路制御 (R_LC) [Chang2004]との、ネットワークライフタイムを比較する。

以下の前提で、各センサノードでのバッテリーの電力消費をモデル化し、シミュレーションを行う。

- 100 個のセンサノードを、100m×100mの正方形のエリアにランダムに配置する。
- シンクノードは、正方形のエリアの 1 つの角から、1 辺の方向に 30m、およびもう 1 辺の方向に 80mの位置に配置する。
- 各センサノードの初期エネルギーは 0.3J。
- 各センサノードの送信レンジの広さは、「Edge Probability」で表現する。送信レンジが広いとソースノードからシンクノードまでのホップ数が少なくできる。ここで Edge Probability とは、1 つのセンサノードの送信可能な範囲に入る他のセンサノードの全体(この場合 99 個)に対する比率を示す。従って、Edge Probability が大きいほど、送信レンジが広いことを意味する。
- 送信時の単位エネルギー消費量は 50nJ/bit+10pJ/bit/m²、受信時の単位エネルギー消費量は 150nJ/bit とした。
- データパケットサイズは 64bit。
- (3-8) 式において、 $\alpha_1=1$ 、 $\alpha_2=\alpha_3=50$ を適用。(これらの値は、比較のために [Chang2000] で使われた値を用いた。)

図3-5にネットワークライフタイムの比較の結果を示す。縦軸は、イベントを検知してソースノードからシンクノードへセンシングデータを送ることができた最後のシミュレーション回数を示す。(つまり、ソースノードからシンクノードにいたる複数のセンサノードのバッテリーが消耗してしまい動作不能になった結果、ネットワーク分断が起こり、センシングデータをシンクノードに届けられなくなるまでのシミュレーション回数。)横軸は、Edge Probability を 0.1~0.5 の場合を示す。Edge Probability に依存して、多少の違いはあるが、R_NRW のネットワークライフタイムは、R_LC のネットワークライフタイムに比べ、最大で約30%長くなっていることがわかる。新しく提案した R_NRW の優位性が確認できた。

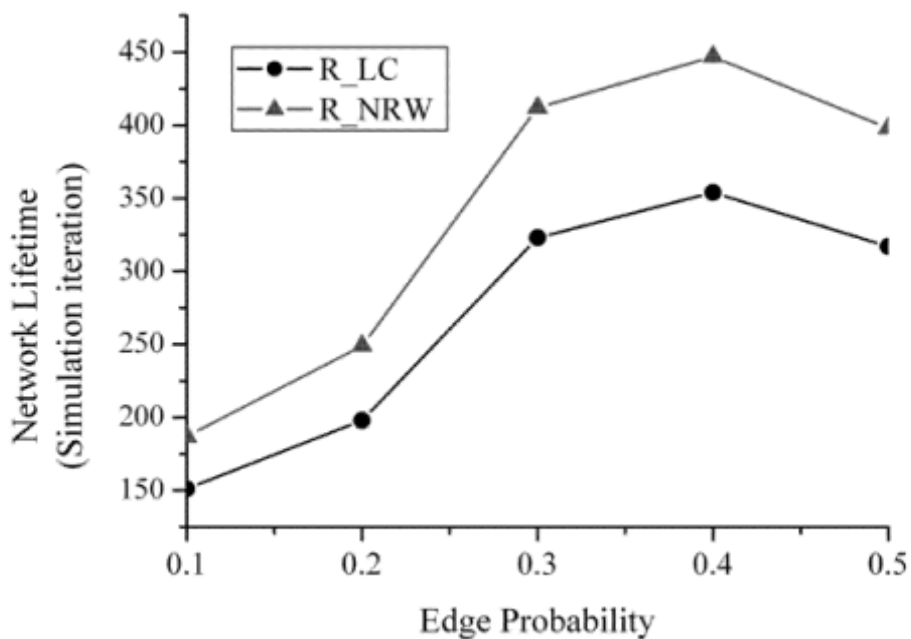


図3-5 シミュレーション結果 (ネットワークライフタイム)

図3-6は、シンクノードが受け取ったトータルのパケット数の比較を示す。縦軸は、シンクノードが受け取ったトータルのパケット数を示す。横軸は、シミュレーションの繰り返し回数を示す。

図3-6において、右肩上がりに直線が飽和し始める直前のところで、複数のセンサノードのバッテリーが消費してしまい動作不能になり、最初のネットワーク分断が起こり、シンクノードにセンシングデータが届かなくなり始め、その後頻繁にネットワーク分断が起こり、最終的には全くシンクノードにセンシングデータが届かなくなり、水平に寝てしまう。この図から、シミュレーションの繰り返し回数が増加したときに、早い時期に **R_LC** のパケット数の伸びが止まるのに対して、**R_NRW** はシミュレーションの繰り返し回数において約2倍の回数になってパケット数の伸びが止まること分かる。

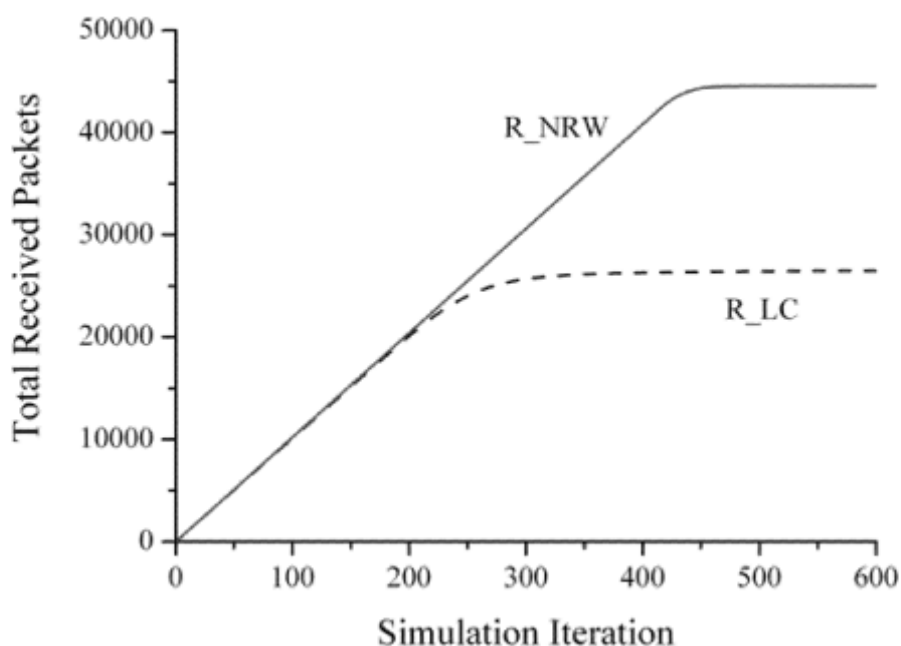


図3-6 シミュレーション結果（トータルの受信パケット数）

これらのシミュレーション結果より、十分な電力エネルギーを持つセンサノードを介するだけでなく、軽い負荷のセンサノードも同様に優先して介する経路制御を採用した **R_NRW** のほうが、**R_LC** に比べ、ネットワークライフタイムを伸ばすことができることを明らかにした。

3. 6 まとめ

無線センサネットワーク構築の上での「ネットワークのライフタイム」とは、「最初にセンサノードが機能しなくなるまでの時間」ではなく「ソースノードからシンクノードへの情報伝達が不能になるまでの時間」であると、本研究では定義し直し、このネットワークのライフタイムを伸ばすための経路制御について検討した。

ネットワークライフタイムを伸ばすためには、消費電力の少ないパスを使い続けるのではなく、時々準最適なパスを選択してもよいから、多くのセンサノードのバッテリーの電力エネルギーの消費を抑え機能し続けるようにする必要がある。

本研究では第1番目に、flat-based routing に分類される経路制御を用いる無線センサネットワークに対して、新しいネットワークライフタイムの定義に基き、ネットワークライフタイムを最大化するための最適制御問題の定式化を、各センサノードのライフタイムの分散の最大値を最小化するというアイデアを用いて、提案した。

第2番目に、flat-based routing に分類される経路制御を用いる無線センサネットワークに対して、新しいネットワークライフタイムを伸ばすことを、ヒューリスティックな各センサノードの経路制御アルゴリズムで実現する場合について、新しいアルゴリズムを提案した。十分な電力を持っているセンサノードを介するのがよいルートであるという考え方に加え、軽い負荷のセンサノードを介する考え方も併せて採用することによって、競合によるエネルギー消費が少なくできるという想定で、従来のメトリックを修正した新しいNRW (node relay willingness) というメトリックを用いた経路制御アルゴリズムを提示した。第3番目に、シミュレーション結果により、提案した経路制御アルゴリズムが、センサノードの残電力エネルギーのみに着目した従来アルゴリズムに比べ、最大約30%長いネットワークライフタイムを持ち、またシンクノードが受け取るトータルのパケット数も多いことを示した。提案したNRW というメトリックを用いた経路制御アルゴリズムの優位性を示せた。

第4章 hierarchical-based routing における消費電力を意識した経路制御の研究

我々の研究グループが先に発表した[Chen2006]、ネットワークライフタイムをより伸ばすために従来の LEACH プロトコルを改良した経路制御法に関して、Crossbow 社の MICAz[Crossbow2006]を用いて実際に無線センサネットワークの構築を試み、改善効果を実測し、シミュレーション結果と比較することを試みる。ここで、LEACH プロトコル[Heinzelman2002]の改良とは、hierarchical-based routing に分類される経路制御の1つである LEACH プロトコルにおいて、従来活用していなかったメタデータ(表2-3を参照)を用いたアグリゲーション機能を新たに追加することで、ネットワークライフタイムを伸ばそうとする提案である。

一般的に、無線センサネットワークシステムのアーキテクチャは、その適用アプリケーションに依存して大きく異なるといわれている。

本研究では、センサノードを大量にばらまき、つまり、センサノード間で検出範囲の重複を承知の上でばらまき、ある程度の長時間監視し、目的とするイベントを何とか検出することを優先するような、アプリケーションを想定している。例としては、第2章で説明した、震災後の瓦礫に埋もれた生存者の救出のため、どこに埋もれているかを探し出し、救出するために、センサをばらまき、生存者の声を何とか検出するという「救助活動支援」アプリケーションが挙げられる。

この例でのシステム要件の主な特徴は以下の通りである。

- ①センサノード自体での処理能力は小さいので、センサノードではできる限りすべての音をすべて検出し、センタ側へ送って人間の声かどうかの複雑処理を行う。
- ②センサノードが重複的に配置されているので、1つのイベントを同時に複数のセンサノードが検出するのが通常である。
- ③センサノードのバッテリーの交換はできないので、バッテリー消耗をできる限り押さえ、さらにいくつかのセンサノードが使えなくなっても、数日間連続して稼動するシステムであることが最も重要である。

4. 1 改良型 LEACH プロトコル

LEACH プロトコルは、**hierarchical-based routing** に分類される、消費電力を意識した無線センサネットワークの経路制御プロトコルの1つである。

LEACH プロトコルでは、ばらまかれた多数のセンサノードが、一定時間ごとに、複数のクラスタに区切られる制御される。1つクラスタの中には、1つのクラスタ・ヘッド (CH) が選ばれ、残りのセンサノードと区別された役割を与えられる。クラスタ内の他のセンサノードはイベントを検知したとき、直接シンクノードにセンシングデータを送ることをせず、必ずCHを介して送る。一般に、センサノード-CH間は距離が短く、CH-シンクノード間は距離が長いため、普通のセンサノードの役割のときに比べ、CHの役割のときの電力消費が大きい。従って、CHの役割の割り当てをいかに均等にするかが、LEACH プロトコルを含む **hierarchical-based routing** の実現においては、大きな課題である。しかし、本研究では、この課題には触れず、1つのクラスタを割り当てられた後の動作において、主にデータアグリゲーションの手法 [Intanagonwivat2000] [Heidemmann2001] [Madden2002] [Krishnamachari2002-1] [Krishnamachari2002-2] [Kalpakis2002] [Zhao2002] [Ye2005]を適用して、電力消費を削減することを改善目標とした改良型 LEACH プロトコルについて議論を展開する。

改良型 LEACH プロトコルとは、イベントを検出した複数のセンサノードとクラスタ・ヘッド (CH) との間の最初の通信にメタデータを用いるという改善を付け加えた LEACH プロトコルのことである [Chen2006]。クラスタヘッドはメタデータを受けとった後に、ただ1つのセンサノードから実際のセンシングデータを受信するようにすることで、センサノードでの電力消費に大きく影響するデータ転送量を削減する。

LEACH プロトコルと改良型 LEACH プロトコルとは、イベント検出時のセンシングデータをシンクノードに届けるまでの動作において、大きく異なる。以下に2つの動作の違いを説明する。

LEACHプロトコル;

検出可能な場所でイベントが発生した時、このイベントの検出範囲内にあるセンサノードは、このイベントを検出すると、センシングデータ（検出情報）を作り出す。その後、このイベントを検出した他のセンサノードもセンシングデータを、関連するクラスタ・ヘッド（CH）に転送し、そして、クラスタヘッドがそれらの情報を集める。ここで、クラスタヘッドは複数のセンサノードから送られたセンシングデータの重複度をチェックし、同じセンシングデータをシンクノードには送らないよう制御する。LEACHプロトコルは、クラスタヘッドにこのようなアグリゲーション機能を持つことを特徴としている。（図4-1参照）

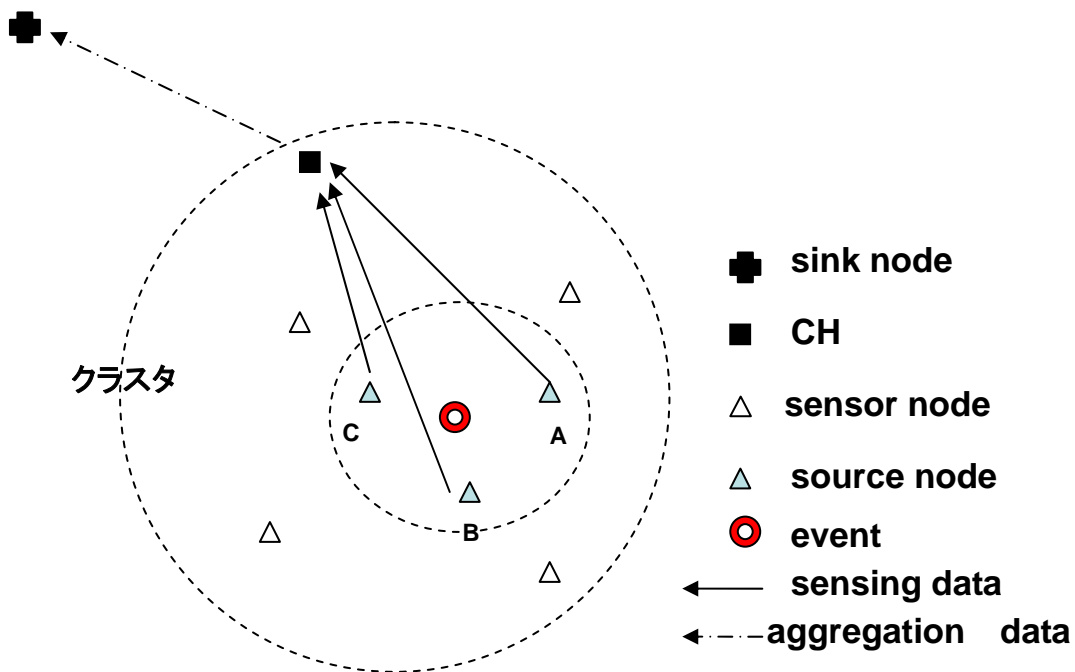
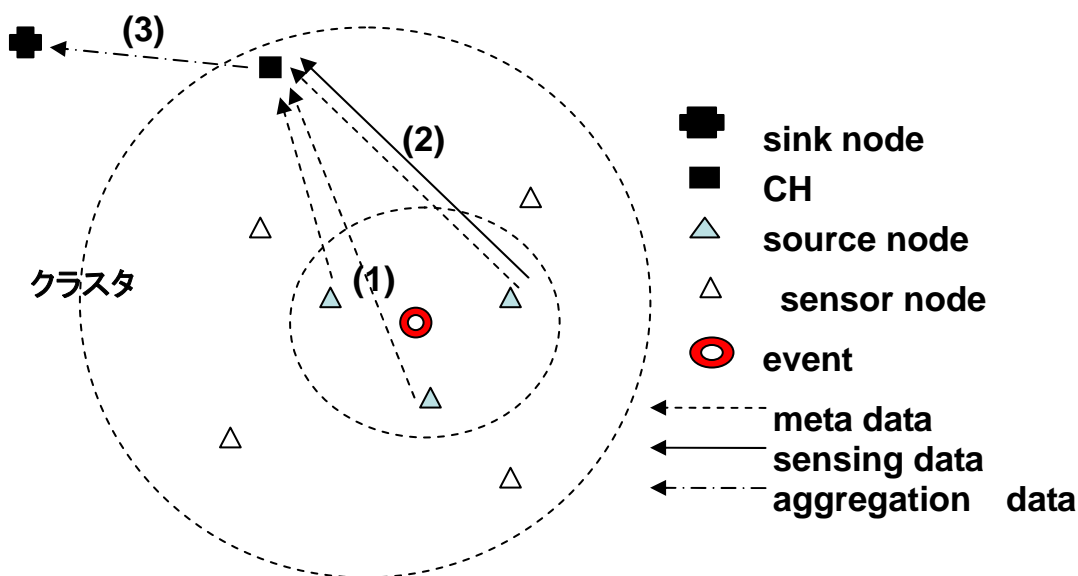


図4-1 LEACHプロトコルの動作

改良型LEACHプロトコル;

検出可能な場所でイベントが発生した時、このイベントの検出範囲内にあるセンサノードは、このイベントを検出すると、センシングデータを作り出す。ここまでは、LEACH プロトコルと同様である。その後、イベントを検出したすべてのセンサノードは、センシングデータに基づいてメタデータを作り出し、関連するクラスタヘッド (CH) に転送する。

(LEACH プロトコルでは、センシングデータをクラスタヘッドに送っていたが、改良LEACH プロトコルではメタデータを送る。)クラスタヘッドがそれらのメタデータを集め、いずれのメタデータも同じイベントに関連したものであるかどうかを識別する。その後、クラスタヘッドは、メタデータが同一と認識した場合、同じメタデータを送ってきたセンサノードの中から、ただ1つのセンサノードに対して、センシングデータを送るように指示し、それを受信する。そのセンシングデータを、クラスタヘッドはシンクノードに送信する。上記動作について、図4-2を参照。



(動作の説明)

(1) イベントを検出したすべてのソースノードは、センシングデータに基づいてメタデータを作り出し、関連するクラスタヘッド (CH) に転送する。

(2) CH がそれらのメタデータを集め、いずれのメタデータも同じであるかどうかを認識する。その後、クラスタヘッドは、メタデータが同一と認識した場合、同じメタデータを送ってきたセンサノードの中から、ただ1つのセンサノードに対して、センシングデータを送るように指示し、センシングデータを受信する。

(3) センシングデータを、CH はシンクノードに送信する。

図4-2 改良型 LEACH プロトコルの動作

改良型 LEACH プロトコルの特徴は、メタデータのデータ長が常にセンシングデータのデータ長に比べて圧倒的に小さいため、1つのイベントの検出範囲にあるすべてのセンサノードとクラスタヘッドとの間のトータルのデータ転送量を大幅に減らせることができることにある。改良型 LEACH プロトコルは LEACH プロトコルに比較すると、1つのセンサノードにおけるデータ送出に伴う電力消費は減るが、メタデータを作成するのに伴う CPU の電力消費が増えることになり、クラスタヘッドにおいてはデータの受信に伴う電力消費は大幅に減るだけでなく、同一かどうか識別のための CPU の電力消費も減ることになる。センサノードの小型化などの進展に伴い、無線伝送に伴う電力消費に比べ、CPU の電力消費は大幅に減少してきていることもあり、改良型 LEACH プロトコルによってセンサノードのトータルの消費電力が、従来の LEACH プロトコルに比べ、格段に減少できる可能性を持つ。

4. 2 改良型 LEACH プロトコルのシミュレーションおよび実験による評価

[Chen2006]において、改良型 LEACH プロトコルの優位性を示すために、主にセンサノード間のデータのやりとりと、センサノード内でのデータ処理による電力消費をモデル化し、そのモデル上で LEACH プロトコルと改良型 LEACH プロトコルの両方に対して、無線センサネットワークシステムのライフタイムをシミュレーションで評価した。

本研究では、Crossbow 社製の MICAz と呼ばれる、我々が最も入手しやすいセンサノードを用いて無線センサネットワークシステムを実験的に組み上げ、その実験システムの上で、上記 2 つのプロトコルの比較を行うことを試みる。この実験を通じて、シミュレーション結果の妥当性を示すとともに、改良型 LEACH プロトコルが将来において、現実的で効果のある提案であることを明らかにすることを試みる。

最初に、シミュレーションのモデル化について説明する。1 度のイベント発生時にシンクノードにセンシングデータを届けるまでの、クラスタ内のトータルの消費電力を以下のようにモデル化する。

①LEACH プロトコルの場合

前提条件を以下のとおり。

- n 個のセンサノードが、距離 l(m)の正方形に一様に分布している。
- p%が CH に選ばれる。
- ソースノードと CH は距離が近く、CH とソースノードは距離が遠い通信を行う。

この場合、イベントが発生した半径 s (m)の円の中に存在するセンサノードの数 N_s は、以下の式で表される。

$$N_s = \pi s^2 \times n / l^2$$

このとき 1 回のイベント検出に伴って、シンクノードにセンシングデータが届くまでの複数のソースノードと CH でのトータルの消費電力 E_{LEACH} は以下の式で表される。

$$\begin{aligned}
 E_{LEACH} &= N_s \times L_d \times E^R && : \text{CH} \leftarrow \text{ソースノード} \\
 &+ N_s \times L_d \times E^{DA} && : \text{CH での処理} \\
 &+ N_s \times L_d \times E^T && : \text{ソースノード} \rightarrow \text{CH} \\
 &+ L_d \times E^T && : \text{CH} \rightarrow \text{シンクノード} \\
 &+ L_d \times \varepsilon_2 \times d_{CH-SN}^4 && : \text{CH} \rightarrow \text{シンクノード (制御)} \\
 &+ \sum_{i=1}^{N_s} L_d \times \varepsilon_1 \times d_{i-CH}^2 && : \text{ソースノード} \rightarrow \text{CH (制御)}
 \end{aligned}$$

ここで、式の説明文において矢印はデータの流を表わすとともに、矢印の左側の部分での電力消費を意味する。

また、記号の意味は以下のとおり。

L_d : 転送データ量 (bit)

E^R : bit あたりの受信部の消費電力(J/bit)

E^T : bit あたりの送信部の消費電力(J/bit)

E^{DA} : CH での bit あたりのデータ処理の消費電力(J/bit)

ε : bit あたりの空間伝搬の消費電力(J/bit/m²あるいは J/bit/m⁴) [Rappaport2002]

d_{CH-SN} : CH とシンクノードの距離(m)

d_{i-CH} : i 番目のソースノードと CH の距離(m)

②改良型 LEACH プロトコルの場合

前提条件は LEACH プロトコルの場合と同様。

このときのトータルの消費電力 E_{META} は以下の式で表される。

$$E_{META} = E_{CH-META} + E_{j-META} + \sum_{i=1, i \neq j}^{N_s} E_{i-META}$$

ここで、第 1 項は CH における消費電力であり、以下のとおり。

$$\begin{aligned} E_{CH-META} &= N_s \times L_m \times E^R && : CH \leftarrow \text{ソースノード (メタデータ)} \\ &+ N_s \times L_m \times E^{DA} && : CH \text{ での処理 (メタデータ)} \\ &+ L_s \times E^T && : CH \rightarrow \text{ソースノード (選択)} \\ &+ L_d \times E^R && : CH \leftarrow \text{ソースノード (データ)} \\ &+ L_d \times E^T && : CH \rightarrow \text{シンクノード (データ)} \\ &+ L_d \times \varepsilon_2 \times d_{CH-SN}^4 && : CH \rightarrow \text{シンクノード (制御)} \\ &+ L_s \times \varepsilon_1 \times d_{i-CH}^2 && : CH \rightarrow \text{ソースノード (制御)} \end{aligned}$$

なお、式の説明文において矢印はデータの流を表わす。

次に第 2 項はセンシングデータを報告するよう指示されたソースノード j における消費電力であり、以下の式で表わされる。

$$E_{j-META} = (L_m + L_d) \times (E^T + \varepsilon_1 \times d_{sel-sn-CH}^2) + L_s \times E^R$$

最後に、第 3 項の基本部は、j 以外のソースノードにおける消費電力であり、以下の式で表わされる。

$$E_{i-META} = L_s \times E^R + L_m \times (E^T + \varepsilon_1 \times d_{unsel-sn-CH}^2) + L_s \times E^R$$

なお、記号の意味は以下のとおり。

L_m : メタデータの転送データ量 (bit)

L_s : 選択したソースノードへの指示の転送データ量 (bit)

$d_{sel-sn-CH}$: 選択されたソースノードと CH の距離(m)

$d_{unsel-sn-CH}$: 選択されなかったソースノードと CH の距離(m)

シミュレーション結果

上述した各センサノードにおけるデータの送受信およびデータ処理における消費電力を積算することでバッテリーの電力消費をモデル化し、シミュレーションによって、改良 LEACH プロトコルと LEACH プロトコルのライフタイムを比較した。

シミュレーションでは 100 個のセンサノードを 100m 四方の正方形にばらまき、シンクノードを、正方形のエリアの 1 つの角から、1 辺の方向に 50m、およびもう 1 辺の方向に 200m の位置に配置する。各センサノードの初期の電力エネルギーを 0.2J とした。全体の 4% のセンサノードが CH に選ばれるとした。表 4-1 のパラメータ値を用いた。メタデータは 4 バイト、センシングデータは 64 バイトとした。

シミュレーションの結果は、改良型 LEACH プロトコルを使った無線センサネットワークシステムのライフタイム（ここでは、最初のセンサノードのバッテリーが消耗し機能しなくなるまでの時間）が、LEACH プロトコルを使った場合の約 1.5 倍以上長くなることを示した。（図 4-3 参照）

表 4-1 パラメータの諸元値

(Operation)	(Energy dissipated)
Transmitter Electronics: E^T	50 nJ/bit
Receiver Electronics: E^R	125 nJ/bit
ϵ_1	10pJ/bit/m ²
ϵ_2	0.001pJ/bit/m ⁴
Data aggregation	5 nJ/bit/message

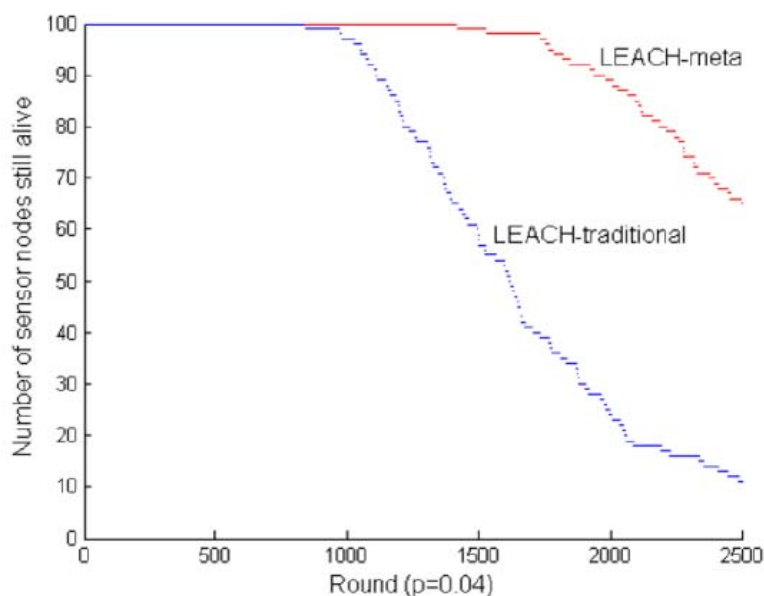


図 4-3 シミュレーションによる LEACH プロトコルと改良型 LEACH プロトコルのネットワークライフタイムの比較

実験結果

無線センサネットワークシステムの各センサノードは、図 2-2 で示したとおり、3つの構成要素（つまりセンサ部、プロセッサ部、送受信部）から成り立っている。1つのセンサノードの消費電力は各構成要素の以下の状態での消費電力の和と考えられる。

- (1-1) センサ部・アクティブ状態（センサ部は常にアクティブ状態）
- (2-1) プロセッサ部・アクティブ状態（情報処理を実行中）
- (2-2) プロセッサ部・アイドル状態
- (3-1) 送受信部・アクティブ状態（送信・受信を実施中）
- (3-2) 送受信部・アイドル状態
- (4) その他（各状態の遷移に伴うオーバヘッド、プロトコルオーバヘッドなど）

すでに述べたシミュレーションでは、(2-1) と (3-1) の消費電力が、他に比べ極めて大きいという仮定のもとで、このケースの消費電力のみに着目してモデル化を行った。そこで、センサノードとして MICAz を用いて、シミュレーションでは極めて小さいとした他ケースの消費電力について、各種実験を通じて分析することを試みた。なお、MICAz のバッテリーの消費電力は直接測定できないので、バッテリーの電圧低下で代行した。また、プロトコル実装およびデータ転送量や電圧低下の計測のために、MICAz のソフトウェアを開発し、実装した。[Crossbow2006]

以下に実験を通じた結果をまとめる。

(1-1) について

今回は光検出センサを用いたが、このセンサ部の消費電力は、プロセッサ部や送受信部に比べ小さい。

(2-2) について

MICAz は TINY-OS という簡略化された構造の OS なので、プロセッサ部のアイドル状態の実現法として、ハード動作を停止させた状態ではなく、プログラムのループ状のアイドル状態にするしかなかった。従って、アイドル状態の消費電力は、アクティブ状態の時とほとんど変わらなかった。

また、プロセッサ部の消費電力は、送受信部（アクティブ状態）に比べ、4倍程度も大きかった。

（3-2）について

送受信部のアイドル状態とは、送信・受信を行っていない状態を指す。MICAz は、送受信を行っていないなくても、電源が入っている限り、送受信している時とほとんど消費電力が変わらないので、送受信部の電源を OFF にすることで、アイドル状態を実装した。この実装の課題は、送受信部を電源 OFF から ON にした後、センサノード間のプロトコル調整ですぐには送受信可能にはならない点である。これは、上記（4）のその他の要因に組み入れられる。

（4）について

複数センサノードからの送信情報を受ける CH にとっては、時分割制御など [EI-Hoiydi2002]によりセンサノード間のぶつかりを防ぐ必要があり、この制御のオーバーヘッドが生まれる。（現時点では、この制御を実装できていない。）また、上記（3-2）のような実装上のオーバーヘッドも電力を必要とする。

現時点の LEACH プロトコルと改良型 LEACH プロトコルの比較のための実験では、MICAz の数が少ないという制約条件もあり、16個のセンサノードと1個の固定的な CH という実験構成を採用し、LEACH プロトコルおよび改良型 LEACH プロトコルの動作を模擬させ、センサノードの転送データ数と消費電力の関係を計測しようと試みた。なお、センサには光センサを用い、ある時間間隔で光を発生させるイベントを起こすことにした。しかし、時分割制御などの実装が未完成であり、LEACH プロトコルおよび改良型 LEACH プロトコルの動作の模擬ができていない。

1つのセンサノードに着目し、LEACH プロトコルでメタデータの約5倍データ量のセンシングデータを送信する場合と、改良型 LEACH プロトコルでメタデータしか送信しない場合について、センサノードの電圧（センサノードの電圧は消費電力が増えるとともに下がる）の状況を時間経過で実測すると、図4-4のように改良型 LEACH プロトコルではセンサノードのライフタイムが約1.2倍に伸びることを確認した。（ただし、頻繁にメタデータが発生するケースを想定。）

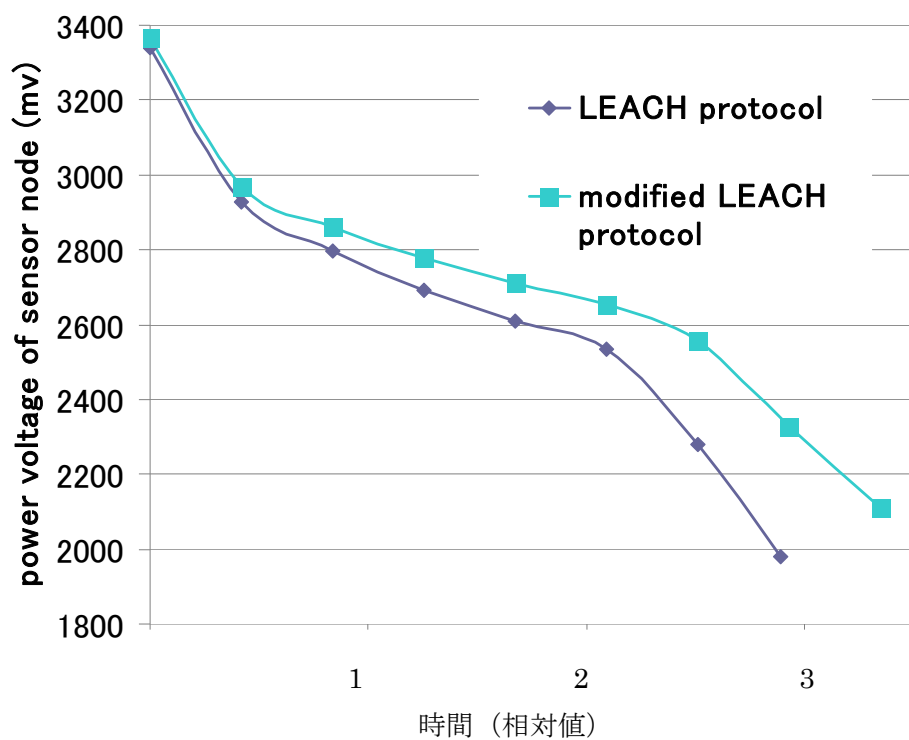


図4-4 LEACH プロトコルと改良型 LEACH プロトコルのセンサノードの電圧値の時間経過の比較

4. 3 まとめ

無線センサネットワークの hierarchical-based routing に分類される経路制御の代表である LEACH プロトコルに比べ、我々の提案した改良型 LEACH プロトコルが、消費電力の面で、理想的なセンサノードを用いたシミュレーションでは、約 1.5 倍の系全体のライフタイムを達成できることをすでに示していたが、本研究では、現在我々が最も入手しやすい MICAz を用いて、実験を通して、シミュレーション結果の妥当性について検討した。

以下に、その結果をまとめる。

(A) MICAz では、プロセッサ部のアイドル状態をプログラマブルなループ走行で実現しているため、その消費電力が無視できず、アクティブ時と同様に扱う必要がある。さらに実験から、プロセッサ部のアクティブ時の消費電力は、送受信部のアクティブ時の消費電力に比べ約 4 倍もあった。

これは現在のセンサノードならば、シミュレーション結果の改良型 LEACH プロトコルの効果をかなり減らすことを示唆している。しかし、将来、センサノードの OS の機能向上が行われ、プロセッサ部の部品技術が向上するはずなので、電力消費が削減できるようになるに違いないので、それほど問題視する必要はない。

(B) MICAz では、送受信部のアイドル状態を送受信部の電源 OFF とすることで実現できるが、その場合の欠点として、通信可能状態までの準備に時間がかかる。つまり、実際に転送できるまでに無駄な電力（主にセンサノード間のプロトコルのオーバーヘッド）を消費する。電源 ON でデータ転送していない状態を、スリープモードのように極力電力消費を抑えるように実現する必要がある。[Cao2005] [Lu2005] [Shi2007]

(C) 1つのセンサノードに着目すると、メタデータがセンシングデータの 5 分に 1 のデータ転送量の場合、改良型 LEACH プロトコルの方が約 1.2 倍センサノードのライフタイムを伸ばせることを確認した。

以上より、現時点では、MICAz を用いて改良型 LEACH プロトコルの実装を実現できていないが、改良型 LEACH プロトコルの改善効果がシミュレーション結果より少ないものの、無線センサネットワークのライフタイムをより伸ばせることを現実的に示せた。また、センサノードとしての改善点も明確化できた。

第5章 結論

本章では、本研究全体の結論と成果についてまとめる。

本研究では、無線センサネットワーク特有の、センサノードの限られたバッテリー容量と、乏しいプロセッシング能力と、低い転送能力という条件下で、無線センサネットワーク全体として機能し続ける時間の長い経路制御プロトコルをいかに実現するかに取り組んだ。

今後の無線センサネットワークの適用アプリケーションとして、低価格化・小型化が進んだセンサノードを、数百―数千程度の大量に、かつセンサノード間の検知範囲を冗長にしてばらまく「イベント検知型」のタイプが増えてくると予想する。このように大量にばらまくので、最初から工数面でバッテリーの交換は行うことは考えず、使い切ることを前提とする。このタイプにあたる代表例のアプリケーションとして「救済活動支援」を取り上げ、無線センサネットワーク構築の要件をとりまとめた。

上記のようなタイプのアプリケーションにとって、無線センサネットワーク構築の上での「ネットワークのライフタイム」とは、「最初にセンサノードが機能しなくなるまでの時間」ではなく「ソースノードからシンクノードへの情報伝達が不能になるまでの時間」であると定義した。この定義の下で、flat-based routing に分類される経路制御に対して、消費電力を意識してネットワークライフタイムを最大化するという問題を、新規に最適制御問題として定式化を行った。

次に、現実的には、無線センサネットワーク内の個々のセンサノードにおいて、独立的な動きの中で経路制御を行う必要があるので、上記のネットワークライフタイムの考え方に基く個々のセンサノードにおけるヒューリスティックな経路選択の制御アルゴリズムを提案した。この提案は、リンクコスト（送受信に伴う消費電力とセンサノードの残バッテリー容量とを結び付けたもの）のみのメトリックを用いた従来の手法に、センサノードの負荷状態を組み合わせた新しいエネルギーメトリックである。この提案が、従来手法に比べてどの程度効果があるかについて、シミュレーションを用いて評価した。その結果、従来のリンクコストのみのメトリックを用いた制御アルゴリズムに比べ、ネットワークライフタイムを約30%伸ばせることを明らかにした。

一方、**hierarchical-based routing**に分類される経路制御の代表的な **LEACH** に対して、我々の研究グループがすでに、ネットワークライフタイムを伸ばすことを目標に、従来使用していなかったメタデータを用いたアグリゲーション機能を付加した改良を提案してきた。

本研究では、この改良型 **LEACH** の改善効果について、**Crossbow** 社の **MICAz** を用いて実際に無線センサネットワークの構築を試み、改善効果を実測し、シミュレーション結果と比較することを試みた。結果的には、**MICAz** の機能不足もあり、改良型 **LEACH** を実装・構築することはできなかったが、**MICAz** を使った実際の動作中のバッテリーの電力消費を観測し、シミュレーション結果と比較した。シミュレーションでは、改良型 **LEACH** は従来の **LEACH** に比べ、ネットワークライフタイムを1.5倍以上に伸ばせるとしていたが、実験を通じてシミュレーションのモデル化の問題点、および使用パラメータの問題点などを明確にするとともに、改良型 **LEACH** はネットワークライフタイムを約1.2倍程度伸ばせることを明らかにした。さらに、実験を通じて、現状の **MICAz** の課題および消費電力を意識した経路制御実現のための **MICAz** に代表されるセンサノードの今後の改善点として、プロセッサ部のアイドル状態の実現の必要性だけでなく、送受信部は電源 **OFF** 状態から通信可能状態への遷移時間がプロトコルオーバーヘッドにより長くなるので、送受信部のアイドル状態の必要性を提案した。

本研究の成果により、無線センサネットワーク特有のセンサノードの限られたバッテリー容量を考慮し、無線センサネットワーク全体として機能し続ける時間を長くするためのネットワーク制御の研究を大きく前進させた。しかし無線センサネットワークを適用したアプリケーションを実用的なレベルでの利用するためには、本研究成果を含むネットワーク制御技術に関して、電力消費の問題だけでなく、センサノード間でやりとりするデータのセキュリティ技術など、研究すべき課題がまだ残っている。また、センサノード自体の改善、および他レイヤの研究開発も大いに進める必要がある。[Eschenauer2000] [Naor2001] [Staddon2002] [Wood2002] [Duma2003] [Karlof2003] [Eltoweissy2004] [Perrig2004] [Zhu2004]

無線センサネットワークを用いて、今後大いに水平展開が期待できる「イベント検知型」のタイプの「救済活動支援」のようなアプリケーションを実用的なレベルで利用できるようになると、我々が享受するメリットは図り知れないくらい大きいので、研究対象範囲をさらに広げ、その実現に向け今後も研究を重ねたい。

謝辞

本研究の過程を通じて客観的な視点で、常に多大な助言をいただき、本論文をまとめるにあたって懇切丁寧なご指導を頂いた静岡大学創造科学技術大学院長の水野忠則博士に心より御礼申し上げます。

本論文をまとめる過程で、種々なご指導ご鞭撻を頂きました静岡大学情報学部情報科学科教授の中谷広正博士、静岡大学情報学部情報科学科教授の渡辺尚博士、静岡大学情報学部情報科学科准教授の太田剛博士に感謝の意を表します。

研究を進めるにあたり常にご指導頂いた静岡大学情報学部情報科学科助教の峰野博史博士に深く感謝します。また、水野研究室の陳恵芳氏と鄭懿氏、日本電信電話株式会社サービスインテグレーション基盤研究所主任研究員の爰川知宏氏には同士として本研究を支えて頂いたことに感謝します。

最後に、博士号取得に対してご理解と励ましを頂きました社団法人情報通信技術委員会理事長の井上友二博士(元 日本電信電話株式会社取締役)に御礼申し上げます。

参考文献

- [Akyildiz2002-1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarsubramaniam and E. Cayirci, Wireless sensor networks: A survey, *Computer Networks*, vol.38, pp.393-422, 2002.
- [Akyildiz2002-2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarsubramaniam and E. Cayirci, A survey on sensor networks, *IEEE Communications Magazines*, vol.40, no.8, pp.102-114, 2002.
- [Al-Karaki2004] J. N. Al-Karaki, and A. E. Kamal, Routing techniques in wireless sensor networks: A survey, *IEEE Wireless Communications*, vol.11, no.6, pp.6-28, 2004.
- [Al-Karaki2006] J.N. Al-Karaki and A.E.Kamal, A Taxonomy of Routing Techniques in Wireless Sensor Networks, *Sensor Network Protocols*, 2006
- [Aslam2003] J. Aslam, Q. Li and D. Rus, Three power-aware routing algorithms for sensor networks, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol.3, pp.187-208, 2003.
- [Bahl2000] P. Bahl and V. Padmanabham, RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System, *Proceedings of the IEEE Infocom*, 2000.
- [Bandyopadhyay2003] S. Bandyopadhyay, and E. Coyle, An Energy-Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks, *Proc. of INFOCOM*, 2003.4.
- [Banerjee2001] B. Banerjee, and S. Khuller, A Clustering Scheme for Hierarchical Control in Multi-hop Wireless Networks, *Proc. of INFOCOM*, 2001.4.
- [Bao2003] L. Bao, and J.J. Garcia-Luna-Aceves, Topology Management in Ad Hoc Networks, *Proc. of MobiHoc*, pp. 129-140, 2003.
- [Bhardwaj2002] M. Bhardwaj, and A. Chandrakasan, Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments, *Proc. of the INFOCOM'02*, pp.1587-1596, 2002.
- [Braginsky2002] D. Braginsky, and D. Estrin, Rumor routing algorithm for sensor networks, *Proc. of the WSNA'02*, pp.22-31, 2002.
- [Bulusu2000] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, GPS-less Low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices, *IEEE Personal Communications Magazine*, vol.7, no.5, 2000.
- [Cao2005] Q. Cao, T. Abdelzaher, T. He and J. Stancovic, Towards Optimal Sleep Scheduling in Sensor Networks for Rare-Event Detection, *IPSN2005*, pp.20-27,2005.

- [Cerpa2001] A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, and J. Zhao, Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology, Proc. of ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin American and the Caribbean, 2001.4.
- [Chang1999] J. H. Chang, and L. Tassiulas, Routing for maximum system lifetime in wireless Ad Hoc networks, Proc. of the ACCCC'99, 1999.
- [Chang2000] J. H. Chang, and L. Tassiulas, Energy conserving routing in wireless Ad-Hoc networks, Proc. of the INFOCOM'00, pp.22-31, 2000.
- [Chang2004] J. H. Chang, and L. Tassiulas, Maximum lifetime routing in wireless sensor networks, IEEE/ACM Trans. on Networking, vol.12, no.4, pp.609-619, 2004.
- [Chatterjee2002] M. Chatterjee, S.K. Das, and D. Turgut, WCA: A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks, Cluster Computing, Vol.5, 2, pp. 193-204, 2002.
- [Chen2006] H. Chen, H. Mineno, and T. Mizuno, A Meta-Data-Based Data Aggregation Scheme in Clustering Wireless Sensor Networks, MLASN2006, pp. 43-49, 2006.5.
- [Chien2005] S. Chien, B. Cichy, A. Davies, D. Tran, G. Rabideau, R.Castano, R. Sherwood, D. Mandl, S. Frye, S. Shulman, J.Jones and S. Grosvenor, An Autonomous Earth-Observing Sensorweb, IEEE Intelligent Systems, pp.16-24, 2005.5.
- [Chong2003] C. Y. Chong, and S. P. Kumar, Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges, Proceedings of the IEEE, vol.91, no.8, pp.1247-1256, 2003.
- [Chu2002] M. Chu, H. Haussecker and F. Zhao, Scalable information-driven sensor querying and routing for Ad Hoc heterogeneous sensor networks, International Journal of High Performance Computing Applications, vol.16, no.3, pp.90-110, 2002.
- [Crossbow2006] Crossbow Technology Inc., MPR2400J/420/520 MIB User's Manual, 2006.7.
- [Dam2003] T.van Dam and K. Langendoen, An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, Proc. of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor System, 2003.11.
- [Duma2003] D. Duma, N. Shahmehri and P. Lambricx, A Hybrid Key Tree Scheme for Multicast to Balance Security and Efficiency Requirements, Proc. of WETICE'03, 2003.
- [EI-Hoiydi2002] A. EI-Hoiydi, Aloha with Preamble Sampling for Sporadic Traffic in Ad Hoc Wireless Sensor Networks, Proc. IEEE Int'l Conf. Comm. (ICC), 2002.

- [Elson2003] J. Elson, L. Girod and D. Estrin, Fine-grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts, Proceedings of the ACM Symposium on Networked Embedded Systems, 2003.
- [Eltoweissy2004] M. Eltoweissy, H. Heydari, L. Morales, and H. Sadborough, Combinatorial Optimization of Key Management in Group Communications, J. Network and Systems Management, Vol.12, No. 1, pp.33-50, 2004.
- [Eschenauer2000] L. Eschenauer and V.D. Gligor, A Key Management Scheme for Distributed Sensor Networks, Proc. of CCS'02, pp.41-47, 2000.
- [Ettus1998] M. Ettus, System Capacity, Latency, and power consumption in multihop-routed SS-CDMA wireless networks, Proc. of RAWCON'98, pp.55-58, 1998.
- [Ganeriwal2002] S.Ganeriwal, R. Kumar and M.B. Srivastava, Timing-sync Protocol for Sensor Networks, Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation, 2002.
- [Gober2005] P. Gober, A. Ziviani, P. Todorova, M.D. Amorim, P. Hunerberg, and S. Fdida, Topology Control and Localization in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, Ad Hoc & Sensor Networks, Vol.1, pp. 301-322, 2005.
- [Haenggi2006] M. Haenggi, Opportunities and Challenges in Wireless Sensor Networks, Sensor Network Protocols, 2006
- [Harter1999] A. Harter, A. Hopper, P. Steggle, A. Ward and P. Webster, The Anatomy of a Con-text-Aware Application, Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'99, 1999.
- [He2000] T. He, C. Huang, B.M. Blum, J.A. Stankovic and T.F. Abdelzaher, Range-Free Localization Schemes in Large Scale Sensor Networks, Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'03, 2003.
- [Heidemann2001] J. Heidemann, F. Silva, C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, and D. Ganesan, Building Efficient Wireless Sensor Networks with Low-Level Naming, Proc. of ACM Symposium on Operating Systems Principles, 2001.10.
- [Heinzelman1999] W. Heinzelman, J. Kulik and H. Balakrishnan, Adaptive Protocols for Information Dissemination in wireless sensor networks, Proc. of the MobiCom'99, pp.174-185, 1999.

- [Heinzelman2000] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, Energy-efficient routing protocols for wireless microsensor networks, Proc. of the HICSS'00, pp.3005-3014, 2000
- [Heinzelman2002] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks, IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol.1, No.4, pp. 660-667, 2002.10..
- [Hightower2002] J. Hightower, R. Want and G. Borriello, SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength, UW CSE 2000-02-02, 2000.
- [Intanagonwiwat2000] C. Intanagonwiwat, R. Govindan and D. Estrin, Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks, Proc. of the MobiCom'00, pp.56-67, 2000.
- [Intanagonwiwat2003] C. Intanagonwiwat, R. Govindan and D. Estrin, Directed diffusion for wireless sensor networks, IEEE/ACM Trans., Networking, vol.11, no.1, pp.2-16, 2003
- [Kalpakis2002] K. Kalpakis, K. Dasgupta, and P. Namjoshi, Maximum Lifetime Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks, Proc. of IEEE International Conf. on Networking, 2002.
- [Kamimura2004] J. Kamimura, Energy-Efficient Clustering Method for Data Gathering in Sensor Networks, Proc. of the Annual International Conference on Broadband Networks, 2004.10.
- [Krishnamachari2002-1] B. Krishnamachari, D. Estrin, and S. Wicker, Modeling Data-Centric Routing in Wireless Sensor Networks, Proc. of INFOCOM, 2002.
- [Krishnamachari2002-2] B. Krishnamachari, D. Estrin, and S. Wicker, The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks, Proc. of Inter. Workshop on DEBS, 2002.7.
- [Larlof2003] C. Karlof, D. Wagner, Secure Routing in Wireless Sensor Networks: Attacks and Countermeasures, Proc. of SNPA'03, pp.113-127, 2003
- [Li2004] J. Li, and G. Lazarou, A Bit-Map-Assisted Energy-Efficient MAC Scheme for Wireless Sensor Networks, Proc. of 3rd Inter. Symposium on IPSN, 55-60, 2004.4.
- [Lin1997] C. R. Lin, and M. Gerla, Adaptive Clustering for Mobile Wireless Networks, IEEE Journal on Selected Areas Communications, Vol.15, No.7, pp. 1265-1275, 1997.9.

- [Lindsey2001] S. Lindsey and C. Raghavendra, PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems, *Int. Conf. Communication Protocols*, pp.149-155, 2001.
- [Lindsey2002] S. Lindsey, and C. Raghavendra, PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems, *Proc. of IEEE Aerospace Conference*, 3(9-16), pp. 1125-1130, 2002.
- [Lu2005] G. Lu, N. Sadagopan, B. Krishnamachari and A. Goel, Delay efficient sleep scheduling in wireless sensor networks, *INFOCOM2005*, pp.2470-2481, 2005.
- [Lundquist2003] J. Lundquist, D. Cayan, and M. Dettinger, Meteorology and Hydrology in Yosemite National Park: A Sensor Network Application, *Proc. of 2rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 2003.4.
- [Madden2002] S. R. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, and W. Hong, TAG: A Tiny Aggregation Service for Ad-Hoc Sensor Networks, *Proc. of the Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, 2002.12.
- [Michail2003] A. Michail, and A. Ephremides, Energy-efficient routing for connection-oriented traffic in Ad-Hoc wireless networks, *Mobile Networks and Applications*, vol.8, no.5, pp.517-533, 2003.
- [Mills1991] D.L. Mills, Internet Time Synchronization: The Network Time Protocol, *IEEE Trans. on Communications*, vol.39, no.10, 1991.
- [Naor2001] D. Naor, M. Naor and J. Lotspiech, Revocation and Tracing Schemes for Stateless Receivers, *LNCS*, Vol. 2139, pp.41-62, 2001.
- [Perrig2004] A. Perrig, J. A. Stankovic, D. Wagner, Security in Wireless Sensor Networks, *Communications of the ACM*, Vol. 47, pp.53-57, 2004.
- [Rappaport2002] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [Rhee2005] I. Rhee, A. Warrier, M. Aia, and J. Min, Z-MAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks, *Proc. of the 3rd ACM Conference on ENSS*, 2005.11.
- [Rodoplu1999] V. Rodoplu, and T. H. Meng, Minimum energy mobile wireless networks, *IEEE JSAC*, vol.17, no.8, pp.1333-1344, 1999.
- [Pottie2000] G.J. Pottie, and W.J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors", *Communications of the ACM*, Vol.43, No.5, pp. 551-558, 2000.5.

- [Priyantha2000] N. Priyantha, A.Chakraborty and H. Balakrishnan, The Cricket Location-Support System, Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'00,2000.
- [Sadagopan2003] N. Sadagopan, B. Krishnamachari and A. Helmy, The acquire mechanism for efficient querying in sensor networks, Proc. of the SNPA'03, pp.149-155, 2003.
- [Schurgers2001] C. Schurgers, and M. B. Srivastava, Energy efficient routing in wireless sensor networks, Proc. of the MILCOM'01, pp.357-361, 2001.
- [Servetto2002] S. Servetto, and G. Barrenechea, Constrained random walks on random graphs: Routing algorithms for large scale wireless sensor networks, Proc. of the WSNA'02, pp.12-21, 2002.
- [Shah2002] R. C. Shah, and J. M. Rabaey, Energy aware routing for low energy Ad Hoc sensor networks, Proc.of the WCNC'02, pp.350-355, 2002.
- [Shah2006] R.C.Shah, D.Petrovic and M.Rabaey, Energy-Aware Routing and Data Funneling in Sensor Networks, Sensor Network Protocols, 2006.
- [Shi2007] X. Shi and G. Stromberg, SyncWUF:An Ultra Low-Power MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, IEEE Trans. on mobile computing, Vol.6, No.1, pp. 115-125, 2007.6.
- [Singh1998] S. Singh, M. Woo and C. S. Raghavendra, Power-aware routing in mobile Ad Hoc networks, Proc. of the MobiCom'98, pp.181-190, 1998.
- [Sohrabi2000] K. Sohrabi and J.Pottie, Protocols for self-organization of a wireless sensor network, IEEE Personal Commun., vol.7, no.5, pp.16-27, 2000.
- [Staddon2002] J. Staddon, S. Miner, M. Franklin, D. Balfanz, M. Malkin and D. Dean, Self-healing Key Distribution with Revocation, Proc. of ISSP'02, pp.224-240, 2002.
- [Stankovic2003] J.A. Stankovic, T.E. Abdelzaher, C. Lu, L. Sha and L.C. Hou, Real-time communication and coordination in embedded sensor networks, Proc. IEEE, vol.91, pp.1002-1022, 2003.7.
- [Szewczyk2004] R. Szewczyk, E. Osterwell, J. Polastre, M.Hamilton, A. Mainwaring and D. Estrin, Habitat Monitoring with Sensor Networks, Comm. ACM,Vol. 47, No. 6, pp. 34-40, 2004.

- [Tay2004] Y. Tay, K. Jamieson, and H. Balakrishnan, Collision- Minimizing CSMA and Its Applications to Wireless Sensor Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, August 2004.
- [Wameke2005] B. Wameke, M. Last, B. Liebowitz, and K.S.J. Pister, Smart Dust: communicating with a cubic-millimeter computer, *Computer*, vol.34, pp.44-51, 2001.
- [Wood2002] A. D. Wood, and J. A. Stankovic, Denial of Service in Sensor Networks, *IEEE Computer*, Vol.35, pp.54-62, 2002.
- [Xu2004] N. Xu, S. Rangwala, K. Chintalapudi, D. Ganesan, A. Broad, R. Govindan, A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring, *Proc. of ACM Sensys*, 2004.11.
- [Xue2005] Y. Xue, Y. Cui, and K. Nahrstedt, Maximizing Lifetime for Data Aggregation in Wireless Sensor Networks, *Mobile Networks and Applications*, 2005.
- [Yao2002] Y. Yao, and J. Gehrke, The cougar approach to in-network query processing in sensor networks, *SIGMOD Record*, vol.31, no.3, pp.6-18, 2002.
- [Ye2001] Ye, F., A. Chen, S. Liu and L. Zhang, A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks, *Proc. of the ICCCN'01*, pp.304-309, 2001.
- [Ye2004] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks, *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Vol.12, No.3, pp. 493-506, 2004.
- [Ye2005] M. Ye, C. Li, G. Chen, and J. Wu, EECS: An Energy Efficient Clustering Scheme in Wireless Sensor Networks, *Proc. of IEEE IWSEEASN'05*, 2005.
- [Younis2004] O. Younis, and S. Fahmy, HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad-hoc Sensor Networks, *IEEE Trans. on Mobile Computing*, Vol.3, No.4, pp. 660-669, 2004.
- [Zhao2002] J. Zhao, R. Govindan, and D. Estrin, Residual Energy Scans for Monitoring Wireless Sensor Networks, *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 17-21, 2002.3.
- [Zhu2004] S. Zhu, S. Setia, S. Jajodia, P. Ning, An Interleaved Hop-by-Hop Authentication Scheme for Filtering False Data in Sensor Networks, *Security and Privacy*, 2004.
- [Zussman2002] G. Zussman, and A. Segall, Energy efficient routing in Ad Hoc disaster recovery networks, *Proc. of the INFOCOM'03*, pp.682-691, 2003.

[10 Emerging2003] 10 Emerging Technologies That will Change the World, Technology Review, vol.106, no.1, pp.33-49, 2003.

- [阿波 2006] 阿波俊一郎、「マイクロマシン技術を用いたセンサデバイスの開発と適用事例」、信学誌、vol.89、no.5、pp.399-404、2006.5
- [安藤 2005] 安藤繁、田村陽介、戸辺義人、南正輝、「センサネットワーク技術」、東京電機大学出版局、2005
- [江刺 2006] 江刺正喜、「センサネットワークに関連する MEMS 技術」、信学誌、vol.89、no.5、pp.395-398、2006.5
- [小川 2006] 小川明、「センサネットワーク総論」、信学誌、vol.89、no.5、pp.362-366、2006.5
- [気象庁 2007] 気象庁、「気象業務はいま」、pp.17、2007.8
- [阪田 2005] 阪田史郎編、「ZigBee センサネットワーク」、秀和システム、2005
- [阪田 2006] 阪田史郎、「センサネットワーク」、オーム社、2006
- [産総研 2006] 産業技術総合研究所、「大規模に分散したセンサのネットワーク技術を開発」、http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2006/pr20061109/pr20061109.html
- [総務省 2004] 総務省ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会、「ユビキタスセンサーネットワーク実現に向けて（最終報告）」、2004.7
- [総務省 2005] 総務省近畿総合通信局、「センサネットタウンに関する調査検討会報告書」、2005.4
- [豊田 2006] 豊田新、「センサネットワークを活用した環境モニタリングシステム」、電子情報通信学会誌、Vol.8、No.5、pp.419-423、2006.5
- [阪神] 阪神・淡路大震災教訓情報資料集,<http://www.ijinet.or.jp/kyoukun/>
- [兵庫県 1996] 兵庫県警察本部、「震災当日の救助・捜索状況」、阪神・淡路大震災警察活動の記録 都市直下型地震との闘い、pp. 71-75、1996

筆者発表論文

【学術雑誌等に発表した論文】

[1] Y. Obashi, H. Chen, H. Mineno and T. Mizuno, An Energy-Aware Routing Scheme with Node Relay Willingness in Wireless Sensor Networks, In International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC), Vol.3, No.3, pp.565-574, 2007.8.

【国際会議に発表した論文】

[1] Y. Obashi, T. Kokogawa, Y. Zheng, H. Chen, H. Mineno and T. Mizuno, Evaluation of Meta-Data-Based Data Aggregation Scheme in Clustering Wireless Sensor Networks, 11th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (KES2007), LNAI Vol.4694, pp.477-483, 2007.9 (Vietrisul Mare, Italy).

[2] H. Chen, H. Mineno, Y. Obashi, T. Kokogawa and T. Mizuno, KCT-based Group Key Management Scheme in Clustered Wireless Sensor Networks, In Proc. of the 2007 International Conference on Embedded Software System (ICESS2007), 2007.5.

[3] H. Chen, H. Mineno, Y. Obashi, T. Kokogawa and T. Mizuno, Adaptive Data Aggregation for Clustered Wireless Sensor Networks, The 4th International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC-07), pp.475-484, 2007.7.

【研究会に発表した論文】

[1] 鄭懿, 峰野博史, 陳恵芳, 爰川知宏, 小橋喜嗣, 水野忠則, 「メタデータを用いた無線センサネットワーク向けデータ集約型通信の実装」, 第 69 回情報処理学会全国大会, 5V-8, pp.3-275-276, 2007.3.

[2] 鄭懿, 峰野博史, 陳恵芳, 爰川知宏, 小橋喜嗣, 水野忠則, 「WSN 向け通信モジュールのスリープモードの設計および実装」, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2007) シンポジウム論文集, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, 2007.7.

[3] 爰川知宏, 小橋喜嗣, 鄭懿, 峰野博史, 陳恵芳, 水野忠則, 「無線センサネットワークの災害現場への適用に関する考察」, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2007) シンポジウム論文集, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, 2007.7.

- [4] H. Chen, Y. Obashi, T. Kokogawa, H. Mineno, and T. Mizuno, Spatial-Correlation-Based Data Aggregation Scheme in Wireless Sensor Networks, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2007) シンポジウム論文集, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, 2007.7.
- [5] 鄭懿, 峰野博史, 陳恵芳, 爰川知宏, 小橋喜嗣, 水野忠則, 「クラスタリングプロトコルを利用した無線センサネットワーク向けスリープモードの検討」, 情報学ワークショップ 2007 (WINF2007) , 2007.9.
- [6] 鄭懿, 峰野博史, 陳恵芳, 爰川知宏, 小橋喜嗣, 水野忠則, 「クラスタリングプロトコルを用いた無線センサネットワーク向けスリープモードの検討」, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会ワークショップ 2007 (DPSWS2007) , 2007.10.
- [7] 爰川知宏, 小橋喜嗣, 鄭懿, 峰野博史, 陳恵芳, 水野忠則, 「無線センサネットワークの災害現場適用に向けた検討」, グループウェアとネットワークサービスワークショップ 2007, 2007.11.