

ワイヤレスセンサネットワークの環境モニタリングへの適用

佐藤裕樹 諏訪敬祐

武蔵工業大学 環境情報学部 情報メディア学科
〒224-0015 横浜市都筑区牛久保西 3-3-1

ワイヤレスセンサネットワークはユビキタス社会を実現するうえで、不可欠な技術であり、様々な分野への導入が進められている。本技術を環境や生態系のモニタリングへ適用する場合には、広範囲な環境情報の取得や電源設備のない地域への導入が要求条件となるためこの条件を満たすセンサノードの開発が重要となる。また、このセンサノードを使用して計測データをマルチホップ通信でデータ転送するときの転送手順を明らかにすることが求められる。

本稿では、環境モニタリングに適用することを前提にカメラと温度センサを統合した電池駆動のセンサノードの構成を明らかにする。次に、マルチホップ通信の経路選択手順と画像データを転送する手順を明らかにする。最後に、機能確認試験とマルチホップ通信適用時のデータ転送を示し、本技術が環境モニタリングへ適用可能であることを示す。

Application of Wireless Sensor Network with Data and Image Sensors to Environmental Monitoring System

Hiroki Sato and Keisuke Suwa

Department of Information Ecology Studies, Faculty of Environmental and
Information Studies, Musashi Institute of Technology
3-3-1 Ushikubo-nishi, Tuzuki-ku, Yokohama, Kanagawa 224-0015 Japan

The wireless sensor network is a promising technique to realize the ubiquitous society. To apply the sensor network to the environmental or ecological monitoring system, the small and low power wireless terminal equipped with several sensors should be developed to be installed in a wide area where a power supply is insufficient. The network protocol of the wireless sensor network in the multi-hop communication should be also clarified. In this paper, firstly, the configuration of the sensor node which possesses the CMOS camera and temperature sensor is explained. Next, the network routing protocol and an image data transmission protocol are described for one and two hop communications. Finally, the transmission performances in the field experiment are shown and the feasibility of the adaptation of the proposed wireless sensor network to the environmental monitoring is investigated.

1. はじめに

近年、各種センサを搭載した小型無線端末を複数配置してユビキタス環境を実現す

るワイヤレスセンサネットワークの研究が活発に行われている。ワイヤレスセンサネットワークの技術を用いて2次元あるいは

3 次元の詳細な環境情報をリアルタイムにかつ一元的に取得、管理できるため環境モニタリング、生態系監視及び防犯、防災などへの適用が期待される。

ワイヤレスセンサネットワークを面的あるいは空間的に広範囲に構築するには、無線技術が重要になるが、最近は無線 LAN、Bluetooth や ZigBee のように高速な無線通信方式が実用化されたことにより、画像などの容量の大きなデータも伝送できるようになった。農業分野では、無線 LAN を用いたフィールドサーバがモニタリング装置として使用され、ネットワーク化されている^{[1], [2]}。このシステムでは、作物の生育状況をリアルタイムに定点観測し、静止画像を収集するため容量の大きなデータを伝送する必要がある。このシステムでは、無線伝送方式に Wi-Fi 規格の無線 LAN を適用しており、消費電力が大きく、電力のインフラが整備されていない地域での利用が困難であるという課題があった。

筆者らは小型無線端末（以下、センサノード）を柔軟に配置できることを目標として消費電力の少ない ZigBee を用い、電池駆動により動作可能で画像データと温度・湿度データの両方を伝送できる端末の研究を行っている。この端末では、電池駆動で 30 万画素程度の静止画像と温度データの伝送をできることを確認している。前回の発表ではセンサノードの構成、画像の連続撮影や間欠動作について明らかにしている^{[3], [4]}。

本研究では、ワイヤレスセンサネットワーク技術を測定地点での画像データや温度データの収集を行う環境モニタリングでの、システム的な研究テーマであるネットワーク経路構築手順、画像伝送手順及び伝送特性などを明らかにする。また、大学構内で

マルチホップ通信を行った実験例を紹介し、研究中のセンサノードの適用性について述べる。

2. ワイヤレスセンサネットワークと適用分野

ワイヤレスセンサネットワークは各種センサを搭載した多数の小型無線端末を分散配置し、センサからの情報を無線通信により伝送し、ネットワークで収集、管理する技術である。この技術により、温度、湿度、照度、加速度、気圧などの環境に関する情報を一元的に取得することが可能になり、現象の把握、解明に大きく役立つ。センサを搭載した小型無線端末がセンサノードであり、小型、軽量、低消費電力化が重要となる。

ユビキタス社会の実現に向けてワイヤレスセンサネットワークは環境、農業、防犯・防災、商品管理、物流及び医療・健康など多方面な分野への適用が検討されている。

図 1 は筆者らが検討している環境モニタリング用ワイヤレスセンサネットワークの構成である。センサノードは第 3 章で述べるようにカメラ、温度センサを搭載しており統合型とよぶ。図 1 は、近距離のためマルチホップ通信を行わない構成である。ZigBee の 2.4GHz 帯無線区間、アクセスポイントを経て、静止画像、温度データがイーサネットを経由、さらにネットワークで複数のデータが収集される。

図 2 は総務省が検討している大規模災害時に IC タグを空中から散布し、被害地の詳しい情報収集を行う構想である^[5]。IC タグは送受信可能で、熱、赤外線、振動などを検知するセンサを内蔵している。火災の熱や負傷者の体温、振動を検知し、微弱電波

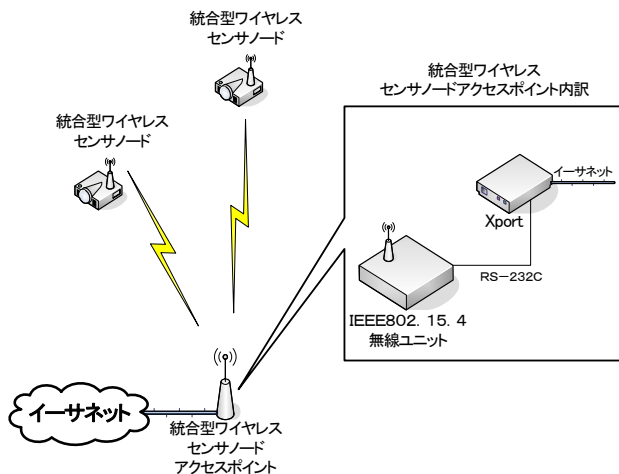


図1 環境モニタリング用ワイヤレスセンサネットワーク

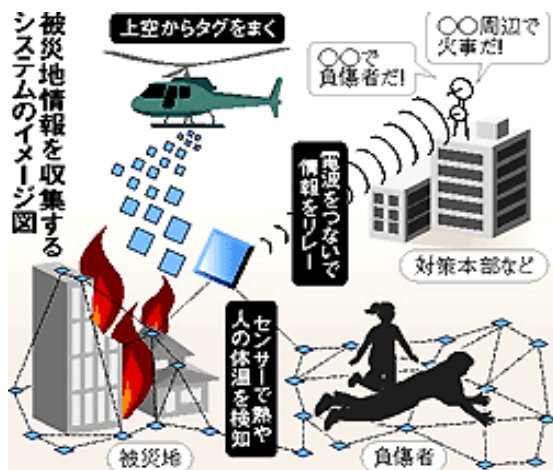


図2 ICタグの大量散布による大規模災害被災地の情報収集

によりバケツリレー方式で対策本部や通信基地局に情報伝達するものである。この図では画像伝送には触れていないが、本研究のようにカメラを搭載した統合型センサノードであれば、被災状況の把握に一層有効であると考えられる。

3. センサノード(カメラ統合型)

3.1 ハードウェア構成

本研究で使用するセンサノードに対する要求条件は以下のとおりである。

- ・ 小型、低消費電力であり、電池駆動できること
- ・ 静止画像を取得できること
- ・ マルチホップ通信ができること

上記の条件を満たすために実現した主要機能は

- (1) VGA サイズの画像撮影 (JPEG 形式) 機能
 - (2) 温度データ取得機能
 - (3) ZigBee (IEEE802.15.4) によるデータ伝送 (マルチホップ通信可能) 機能
 - (4) 電池 (ソーラー充電可能) 駆動機能
- であり、これらは 1 チップマイコン (M16C/26) を使用して制御される。ソーラーパネルの出力は 800mA (5.5V) である。

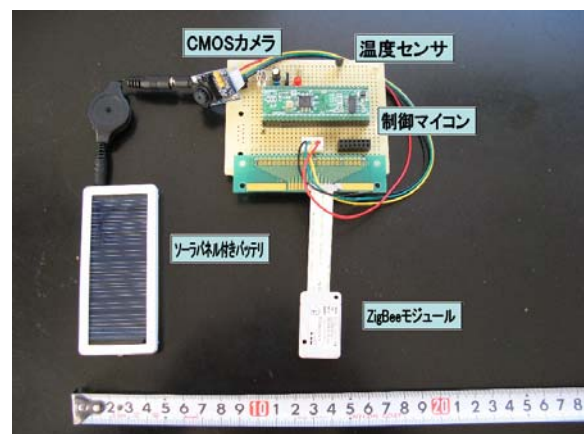


図3 統合型センサノード

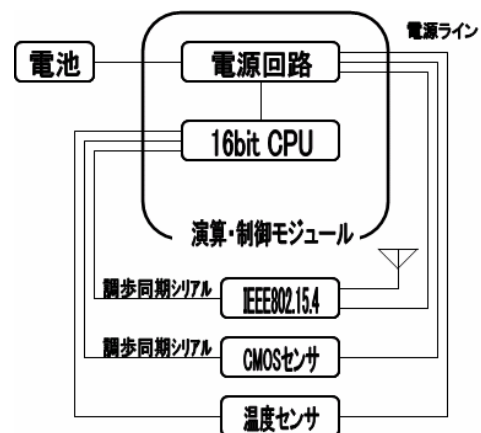


図4 統合型センサノードの構成

図3 はカメラ (CMOS 型) と温度センサを搭載

載し、電池で駆動できる統合型センサノードの外観である。図 4 に構成図を示す。

3.2 ネットワーク構成

図 4 のセンサノードを使用し、本研究では図 5 のようなネットワークを構築する。センサノードは搭載したセンサによるデータ取得と取得データをマルチホップ通信で転送する機能を有する。マルチホップ通信によりセンサノードを中継点としての機能を持たせてモニタリング可能なエリアの拡大を図ることができる。本研究では、2 ホップまでのネットワークを実際に構築し、取得範囲の拡張可能性について検討する。また、センサノードからの経路情報をもとに管理 PC が通信経路を指定する方式とする。

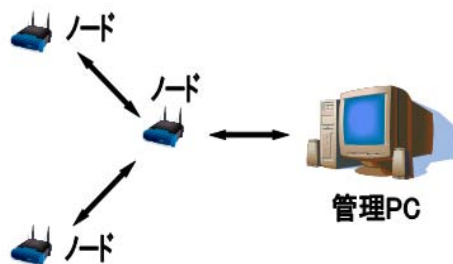


図 5 構築するネットワーク

4. ネットワークプロトコル

ネットワーク構築で使用する ZigBee のパケットの概要を図 6 に示す^[6]。

ZigBee ヘッダで送信先の ID、送信元の ID を指定し、ZigBee モジュールが該当のセンサノードに対してデータの転送を行う。その次は命令の種類を指定するバイトであり、経路情報取得用とセンシング用に 6 種類のいずれかが指定される。データ領域は最大 110byte 送信可能であり、命令毎に経路情報や現在地情報、センシングデータな

どに使用する。画像データを転送する場合、最大ホップ数は 1 ホップの経路情報を送信するのに 6byte、2 ホップ以上は 4byte 必要とし、画像データの転送用に 50byte 必要なため最大 14 ホップまでとなる。

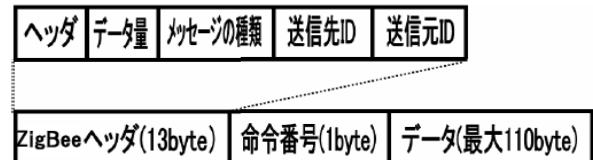


図 6 ZigBee のパケット構成

4.1 経路構築手順

経路構築では、センサノードの位置は基本的には移動することはないことを前提に始点経路制御方式^[7]に基づいて、図 7 に示す手順で構築する。RREQ、RREP は以下のとおりである。

RREQ: 経路要求メッセージである。この命令を受け取ったノードは自分の ID を付与し、RREQ の再ブロードキャストを行う。

RREP: 経路応答メッセージである。RREQ を受け取り、再ブロードキャスト完了後、RREQ の経路情報をもとに始点である管理 PC まで転送する。

具体的な手順を以下に示す。

1. 管理 PC より、RREQ をブロードキャストする。
2. ノード 1 から自分の ID を付加し、RREQ を再ブロードキャストする。
3. RREQ の情報をもとに、管理 PC へ RREP を送信する。
4. ノード 2 は自分の ID を付加し、RREQ を再ブロードキャストする。ノード 1 はノード ID に自分の ID が含まれていれば、この RREQ を破棄する。
5. RREQ の経路情報にもとづき、管理 PC

まで RREP を転送する。



図7 経路構築手順

4.2 画像データ転送手順

画像データを転送する手順を図8に示す。管理PCとノード間で転送する場合について説明する。ただし、経路情報は取得済みであるとする。

1. 管理PCからノードに対して画像撮影命令(PIC)を送信する。ノードはカメラで撮影を行う。
2. 撮影したJPEG画像を分割して転送する。一度に転送できる最大データ量は50byteである。残りのデータはACKが返ってくるまで送信待機する。
3. 管理PCがデータを正しく受信できた場合、ノードに受信確認用のACKを送信する。ホップ数が増えるにしたがって、送信待機時間が増大する。

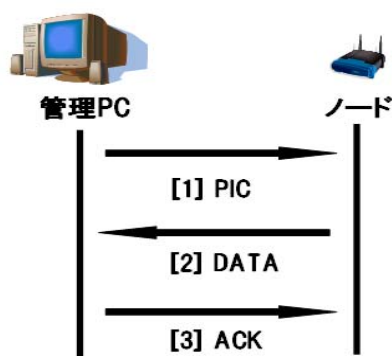


図8 画像データ転送手順

5. 動作実験

5.1 実験概要

第4章の機能確認を行うため動作実験を実施した。実験系は図5のネットワーク構成とし、管理PCにノートPCをセンサノードは第3章で詳述したセンサノードを3個使用した。管理PCにはRS-232Cケーブルでアクセスポイントが接続される。このアクセスポイントは電池駆動でRS-232CインタフェースボードとZigBeeモジュールで構成される。実験では、マルチホップ通信したときの温度データの計測と画像データの取得を行った。

5.2 ネットワーク構築

実際にネットワークを構築したのは本学情報メディアセンター内の1階、2階である。

図9に管理PC、ノード3個の設置状況を示す。図中の番号は識別IDである。図10は1階に設置した管理PCの位置から見たノード3の設置位置である。管理PCの設置位置とノード3の設置位置とは見通し内である。ノード1は2階の階段付近に設置し、

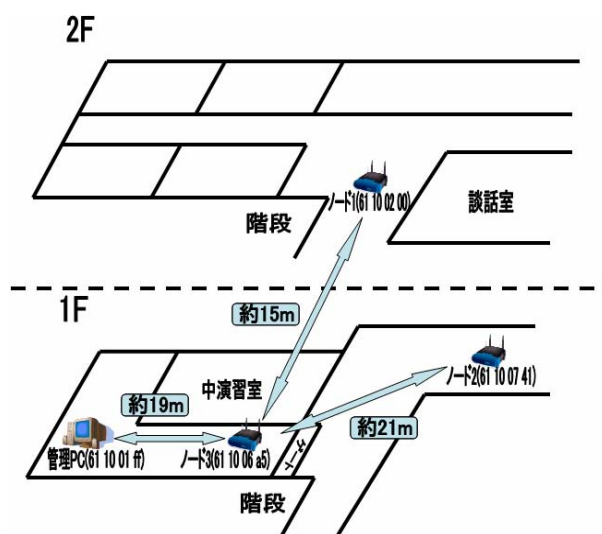


図9 管理PCとセンサノードの設置状況



図 10 管理 PC の位置から見たノード 3 の設置位置

ノード 2 は 1 階の廊下の角から数 m 奥に設置している。

ノード 1、ノード 2、ノード 3 は互いに見通しが悪いか、見通し外の位置関係にある。ノード 1 または、ノード 2 から管理 PC までデータを転送するには、マルチホップ通信によりノード 3 を経由する必要がある。

5.3 温度データ伝送実験

温度データの伝送実験では、1 ホップ及び 2 ホップの各々について 5 回ずつ実験を行い、データを記録した。1 ホップは管理 PC のアクセスポイントから直接通信可能なノード 3 のデータを記録し、2 ホップは直接通信することのできない 2 階のノード 1 からのデータを記録することとした。

実験結果を表 1 に示す。この結果から、直接通信できない範囲のノードからの温度データを受信できることを確認することができた。

表 1 温度データ伝送実験結果

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
1ホップ	16.75℃	17.0℃	16.75℃	16.75℃	17.0℃
2ホップ	17.0℃	17.0℃	17.0℃	17.0℃	17.0℃

※0.25℃区切り

5.4 画像データ伝送実験

画像データ伝送実験の条件は温度データ伝送実験と同一であり、1 ホップ及び 2 ホップの各々について 5 回ずつ実験を行い、画像データを記録した。

動作結果を表 2 に示す。正常に伝送できた場合が「○」、転送失敗が「×」である。転送されたノード 1 及びノード 3 から撮影した画像を図 11、図 12 に示す。

表 2 画像データ伝送実験結果

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
1ホップ	○	○	○	○	○
2ホップ	○	○	○	×	○

表 2 から画像データもマルチホップ通信で転送することができ、容量の大きいデータでも転送できることを確認した。2 ホップの場合、画像データの送信中に停止する現象が発生した。この原因は①カメラからのデータ取得の失敗、②ノードとノードでの通信中のデータ転送の失敗などが考えられる。カメラからのデータ取得に失敗した場合は、強制的に転送終了フラグとエラーが発生したことを伝えるメッセージを送信することで停止を防ぐことができる。データ転送の失敗の場合は管理 PC からデータ受信完了のメッセージが届かなければデータを再送することで解決できると考えられる。

センサノードを連続駆動したときの連続駆動時間は約 6 時間であった。この場合、3 分間隔で温度と画像データを取得し続けた。ソーラーパネル部分は厚紙で覆い、新たな充電を行わないようにした。ノードの消費電力は待機時で約 77mAh、画像データ転送中で最大約 137mAh であり、ソーラーバッテ



図 11 ノード 1 からの撮影画像



図 12 ノード 3 からの撮影画像

リの容量が 800mAh であることから妥当な動作時間と考えられる。動作時間の延長方法としては ZigBee 通信モジュールと制御用マイコンの間欠動作が挙げられ、スリープモードへの移行と復帰のプログラム実装が有効である。両モジュールがスリープモードに移行したときの消費電力は約 13mAh となるので、待機時の 77mAh から大幅に消費電力を削減できるので、間欠動作の効果は大きいといえる。これにより、屋外などでの長期間の環境モニタリングに使用できると考えられる。

5.5 データ伝送特性

図 9 のセンサネットワーク構成において画像データの伝送特性を測定した。伝送は

30 万画素の VGA カメラで撮影した JPEG 画像を 1 ホップと 2 ホップの場合について各 5 回ずつ転送する。1 ホップ及び 2 ホップしたときの画像転送時間と転送された画像容量を記録し、平均転送速度(kbps)を求めている。

1 ホップのときの転送された平均画像データサイズは 11,233byte、2 ホップのときの平均画像データサイズは 10,933byte である。

平均転送時間と平均転送速度の測定結果を図 13 に示す。図よりホップ数が増えると平均転送時間は増大し、平均転送速度は低下することがわかる。マルチホップ通信を行う場合はホップ数が増加するにしたがって、管理 PC までの所要時間がかかるためである。より、高速転送を図るには、画像伝送におけるプロトコルの改良が必要になると考えられる。

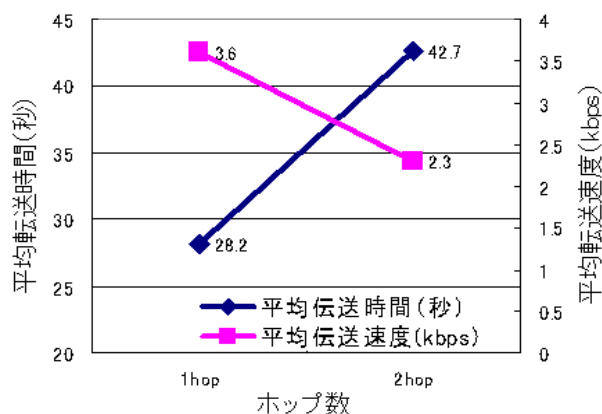


図 13 データ伝送特性

6. おわりに

本研究では、ワイヤレスセンサネットワークの環境モニタリングへの適用を目的としてカメラと温度センサを搭載した統合型センサノードの要求条件を明らかにし、必要な機能を実装した。また、センサノード

を複数用いた実証実験を行うためのネットワーク構成と経路構築プロトコルを示すとともに画像データ転送手順を明らかにした。

検証は本学建物内を使用してマルチホップ通信を行い、1 ホップ及び 2 ホップの場合について温度データ取得及び画像データ取得の実験を行った。ホップ数が増えるにしたがって、平均転送時間の増大、平均転送速度の低下が確認されたが、マルチホップ通信により温度データ及び画像データの転送が確実に行えることが明らかとなった。電源設備がない地域においてもワイヤレスセンサネットワークが環境モニタリングに十分適用可能であることを実証した。

今後は、電池駆動による駆動時間の増大と転送速度の向上が課題であり、前者については間欠送受信によるスリープモードの実装が必要である。ただし、マルチホップ通信では、各ノードの復帰のタイミングを知る必要があるため、管理 PC からの各ノードへの復帰命令の伝達方法を検討する必要がある。後者については、データ転送の際のデータ領域と経路情報領域のデータ割当を工夫することにより転送効率の一層の向上が実現するものと考えられる。

7. 参考文献

- [1] フィールドサーバによるユビキタス環境とセンサネットワークの構築,
<http://model.job.affrc.go.jp/FieldServer/documents/KaruizawaWS.pdf>
- [2] 平藤雅之, 深津時広, 木浦卓治, 胡浩明, 超分散型圃場モニタリングシステムの設計と開発,
<http://www.naro.affrc.go.jp/top/seika/2002/kanto/kan024.html>
- [3] 田中公祐, 佐藤裕樹, 諏訪敬祐, ワイ

ヤレスセンサネットワークにおける画像及びデータ計測センサの統合化とデータ収集法に関する研究, MBL 研究会, 2006. 11

[4] 田中公祐, 佐藤裕樹, 諏訪敬祐, ワイヤレスセンサネットワークにおける画像転送技術に関する研究, 武蔵工業大学環境情報学部情報メディアジャーナル, 第 8 号, pp34-39, 2007. 4

[5] 読売新聞記事, 大災害時、IC タグまき生存者把握・・・総務省が計画, 2006 年 3 月 19 日

[6] 阪田史郎編, ZigBee センサーネットワーク通信基盤とアプリケーション, 秀和システム, 2005. 7

[7] 小牧省三編, 無線技術とその応用 3, 無線 LAN とユビキタスネットワーク, 丸善, 2004. 1