

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

鄭 懿^{†1} 峰野 博史^{†1} 陳 恵芳^{†1}
爰川 知宏^{†2} 小橋 喜嗣^{†3} 水野 忠則 ^{†4}

電池駆動の無線センサノードを用いた無線センサネットワークでは、ライフタイムの最大化が重要な課題である。本稿では、イベントが頻繁でかつ各イベントの持続時間が短い状況で利用を想定した無線センサネットワークにおいて、クラスタリングプロトコル向けの無線通信モジュールをスリープさせる手法について検討する。また、MOTE プラットフォームを用いて、簡易的にスリープモードを実装した基礎実験を行い、センサノードの通信モジュールをスリープさせることが、ライフタイムの増加に大きな効果があることを確認した。

A Study on Sleep Mode for Wireless Sensor Networks with Clustering Based Protocol

YI ZHENG,^{†1} HIROSHI MINENO,^{†1} HUIFANG CHEN,^{†1}
TOMOHIRO KOKOGAWA,^{†2} YOSHITSUGU OBASHI^{†3}
and TADANORI MIZUNO ^{†4}

Almost Wireless sensor networks are driven with the battery. For that reason lifetime maximization is a very important element when design of wireless sensor network. In this paper, we propose a wireless transmission module sleep mode for clustering protocol in order to detect frequent and short event. And we also experiment with MOTE platform to confirm that a simply implementation of wireless transmission module sleep mode can make sensor node's lifetime longer.

1. はじめに

阪神淡路大震災に代表される災害時には、初期の救援活動が極めて重要となる。一般的に災害時の要救助者の生存率は二日を越えると極めて低くなる¹⁾。しかも震災直後の一日目は特に混乱しているため、多数での救援活動は見込めない。そのため限られた数の救助隊員で生存者の位置のめぼしを早急に把握するために、無線センサネットワークのような小型の機械をばらまいて効率よく実施する方法が考えられる。しかし、無線センサネットワークを形成するセンサノードは一

般的にバッテリーで駆動し、その駆動時間（ライフタイム）は制限されている。そのため、限られたバッテリーでできるだけ長く駆動することが望まれる。無線センサノード自体をスリープさせることで、無線センサネットワークのライフタイムを伸ばす検討も行われているが、高密度な状況を想定していたり、イベント発生が少ないアプリケーションを想定しているものが多い。本稿では、災害時の救援活動といったイベント検知のサンプリング周期が短く、各イベントの持続時間が短い状況での利用を想定し、センシング機能は稼働させたまま、無線通信モジュールのみスリープさせる通信モジュールのスリープモードについて検討する。また、世界的に広く利用されているセンサネットワークプラットフォームである MOTE を用いて、その有効性を検証する。

2. 関連研究

近年、センサネットワークのライフタイムを伸ばす目的で、主にクラスタリングプロトコルやセンサノード

^{†1} 静岡大学情報学研究所

Graduate School of Informatics Shizuoka University

^{†2} NTT サービスインテグレーション基盤研究所

NTT Service Integration Laboratories

^{†3} エヌ・ティ・ティ・ソフトウェア株式会社

NTT Software Corporation

^{†4} 静岡大学創造科学技術大学院

Graduate School of Science and Technology Shizuoka University

ドのスリープモードの研究が行われている。以下にそれら研究の概要を記す。

2.1 クラスタリングプロトコル

クラスタリングプロトコルとは多数のセンサノードの中から代表ノードとしてクラスタヘッド (CH) を選出し, CH に近隣の末端センサノードのセンシング情報を集約させて SINK ノードまで通信させるデータ集約型通信プロトコルである。SINK ノードとはネットワーク全体のセンサノードの情報を収集し, 分析できる端末である。CH は中継の役割を果たすため, 末端センサノードより送受信量が多くなり, より多い電力を消費することになるが, 多くのクラスタリングプロトコルでは, CH を定期的に再選することによって, エネルギー消費の負担を分散し, 無線センサネットワーク全体のライフタイムを伸ばすことができる。代表的なクラスタリングプロトコルとして, LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)²⁾ がある。LEACH では, センサノードが連続的に CH にならないように確率を用いて CH の選出と再選を行う。その他にも, より実際の環境を想定したクラスタリングプロトコルとして, 近隣ノードとの距離や角度といったパラメータを利用して CH を選出する HEED³⁾ や, 近隣ノードの数や送受信時の電力消費などを考慮して CH を選出する WCA⁴⁾ なども提案されている。これまでのネットワークシミュレーションによって, センサノードが高密度な状況で, クラスタリングプロトコルの有効性が高いことが示されているが, 実環境の MOTE プラットフォームにおける実装実験では, センサノードは通信しているかどうかに関係なく, 通信モジュールが電力消費しているため, CH と末端センサノードの電力消費がほぼ一致することになり, CH を交代させても, 大きな効果がないことが明らかになっている⁵⁾。

2.2 無線センサノードのスリープモード

一方, センサノード自体の電源をオフし, スリープさせる方式は確実にライフタイムを伸ばすことができる。森林火災のようにイベントの発生頻度が低く, 持続時間が長いイベントを検知するアプリケーションの場合, センサノードのサンプリング間隔を長く設定し, その間にセンサノードをコントロールするマイコンをスリープさせ, 電力消費を抑制することができる。ただし, サンプリング間隔を広げることで, イベントが発生しても, すぐ検知されないこともあるため, 検知遅延が長くなるのが課題である。そのため, イベントが発生するポイントの検知半径に複数のセンサノードが配置される場合は, 異なるスリープ時間を各ノード

に設定することで, 検知遅延を最小化するスケジューリングの最適化に関する研究も行われている⁶⁾。また, クラスタベースの無線センサネットワークでは, CH に遠く離れている末端センサノードの消費電力が大きいため, CH に近い末端センサノードよりスリープ時間を長く設定する必要があることも指摘されている⁷⁾。

以上のように無線センサノードのスリープモードに関する研究が注目を集めているが, 震災後の救助活動といったアプリケーションの場合, イベントの発生頻度が高く, 持続時間が短いという特徴があり, サンプリング間隔を広げる手法では, イベントの検知ができなくなる可能性が高くなり現実的ではない。そのため高頻度かつ持続時間の短いイベント検知に適用可能なスリープモードの検討が必要となる。

3. 提案方式

3.1 通信モジュールのスリープモード

一般的に, センサノードはマイクロコントローラ, 通信モジュール, センサモジュール, 電池モジュールから構成されている (図 1)。近年, 無線通信モジュールとセンサモジュールをコントロールするマイクロコントローラのスリープモードが研究されているが, マイクロコントローラのスリープモードにより, センサモジュールの制御も同時に停止するため, サンプリングの間隔も長くなり, 検知遅延が生じる。そこで, 本研究では, 無線通信モジュールのスリープモードについて検討する。つまり, 無線通信モジュールはスリープさせるが, マイクロコントローラは通常通りに動作するため, サンプリングの間隔は従来と変わらず, 検知ロスが生じない。無線通信モジュールのスリープモードにより検知データの送信はできないが, センサノードはセンシングデータを一時自身のメモリに順番で保存しておくことで, 通信モジュールがオンになるアクティブモードに戻ったときに送信する, この無線通信モジュールのスリープモードとアクティブモードの切り替え周期を適切にスケジューリングすることでセンサネットワークのライフタイムを伸ばす。

3.2 ネットワークトポロジの設計

無線センサネットワークでよく使われるクラスタリングプロトコルの場合, 中継機能を持つ CH と中継機能を持たない末端センサノードがある。本研究でも, センシングとデータの中継機能を両方持つ CH とセンシング機能のみ動作する末端センサノードでの構成を想定している (図 2)。CH の選出は他のクラスタリングプロトコルと同様にラウンド単位 (数時間単位) で行う。CH に選出されたセンサノードは 1 ラウンド

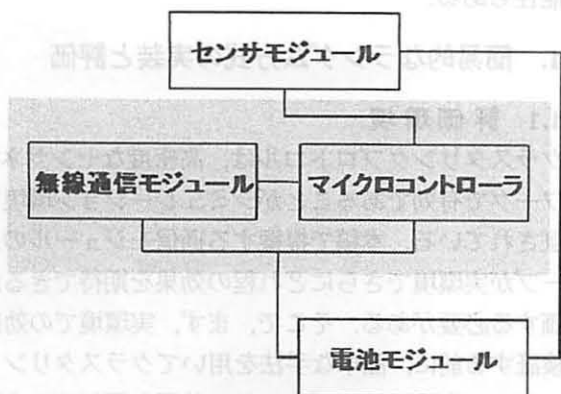


図1 センサノードの構成

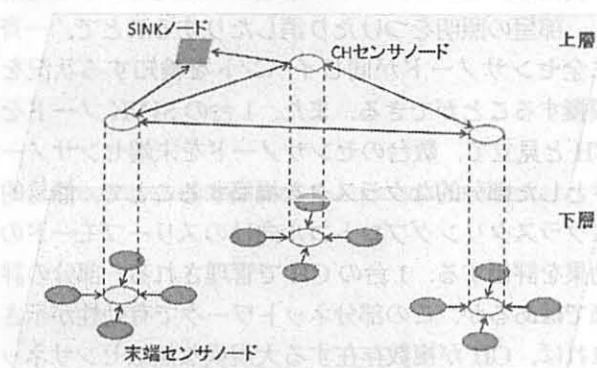


図2 ネットワークトポロジー

単位でCHの役割を果たし、次のラウンドが始まるとクラスタ内では次のCHが再選出される。新たに選出されたCHは新しいクラスタを構築する。この選出アルゴリズムはクラスタリングプロトコルのCH選出アルゴリズム^{2)~4)}を利用することができる。

図2に示すように、ネットワークのトポロジーは一つのCHと複数の末端センサノードから構成されたクラスタの下層と複数のCHとSINKノードから構成される上層の2階層構造になる。下層では、末端センサノードはセンシングしたデータをシングルホップでCHに送信する。上層は、複数のCHによってメッシュ方式で通信が行われる。各CHは受信した末端センサノードのセンシングデータと自身のセンシングデータをSINKノードに送信する。また、CHはシングルホップでSINKノードと通信できない場合は、他のCHを経由し、SINKノードまでマルチホップで送信する。

CHの選出は既存のクラスタリングプロトコルLEACHなど^{2)~4)}のアルゴリズムを利用する。

3.3 クラスタ内のスリープスケジューリング

通信モジュールのスリープに関して、CHは常に送受信を行う必要があるため、通信モジュールをアク

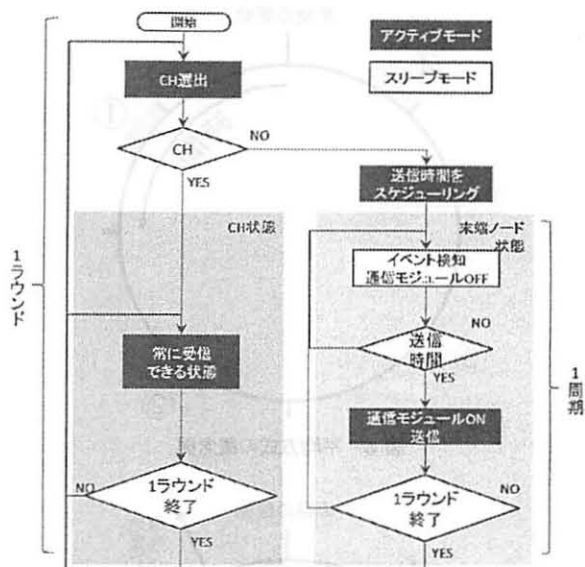


図3 センサノードの動作アルゴリズム

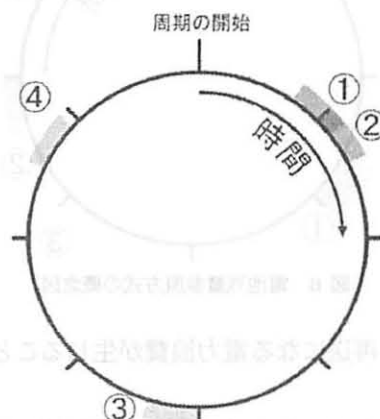


図4 ランダム方式の概念図

ティブモードの状態に維持しなければならない。それに対して、末端センサノードは送信する場合のみ通信モジュールをアクティブモードにし、送信終了後に通信モジュールをスリープモードにすることができる。定期的に末端センサノードはセンシングした情報を送信するため、1ラウンドを数十秒単位の周期に分け、各クラスタ毎にクラスタ内各末端センサノードが1周期におけるアクティブモードになる時間を決める。センサノードの動作アルゴリズムは図3に示す。アクティブモードになる時間を決める方式として、本稿では、ランダム方式、平均方式、電池残量参照方式を検討する。

ランダム方式とは、末端センサノードがランダムで1周期における自身のアクティブモードになる時間を決める方式である(図4)。この方式では、CHと末端センサノード間の制御用データを送る動作がなく、各末端センサノードの時計を同期する必要もないが、複数のセンサノードのアクティブモードになる時間が重なった場合、同一チャネルを使用する通信では衝突

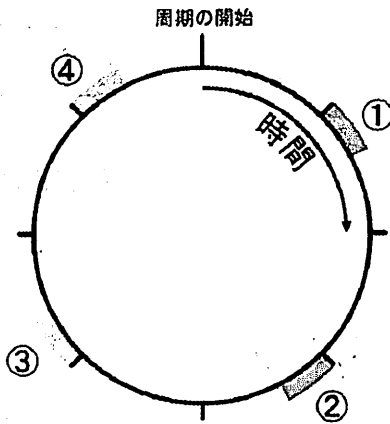


図5 平均方式の概念図

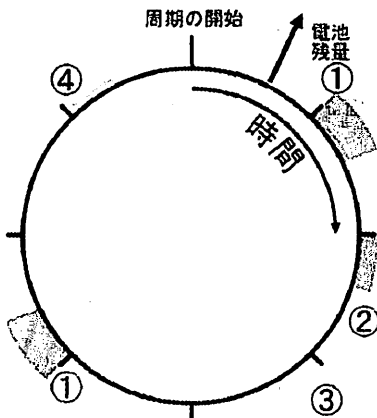


図6 電池残量参照方式の概念図

が発生し、再送になる電力浪費が生じることが考えられる。

平均方式とは、センサノードの数に応じて、CHは平均的に末端センサノードのアクティブモードになる時間を決める方式である(図5)。1周期の中、どの末端センサノードも同じ回数でアクティブモードになるようにCHは制御する。末端センサノードは常に決められた同じ時刻に起き、送信を行う。ランダム方式に比べ、通信の衝突を回避することができる。しかし、CHと末端センサノード間の時刻同期が必要である。

電池残量参照方式とは、クラスタ内の末端センサノードの電池残量状況によって、CHが末端センサノードのセンシング間隔とアクティブモードになる時間と回数を決める方式である(図6)。電池残量が多い末端センサノードは1周期中複数回アクティブモードになり、電池残量が少ない末端センサノードは1周期で1回、もしくは、数周期1回アクティブモードになるため、電池残量の少ないセンサノードにかかる負担を減少させることができる。ランダム方式や平均方式と比べ、電力の消費を分散できる。一方、平均方式と比べると、CHと末端センサノード間の制御データが増え、通信回数の増加によって、電力消費も増加につながる

可能性もある。

4. 簡易的なランダム方式の実装と評価

4.1 評価環境

クラスタリングプロトコルは、高密度なセンサネットワークで有効であることがシミュレーション環境で実証されている。本稿で提案する通信モジュールのスリープが実環境でさらにどれ程の効果を期待できるか評価する必要がある。そこで、まず、実環境での効果を検証する前に、簡単な手法を用いてクラスタリングプロトコル向けスリープモードの効果を評価する方法を検討した。

例えば、センサノードに搭載された光センサを利用し、部屋の照明をつけたり消したりすることで、一斉に全センサノードが同じイベントを検知する状況を模擬することができる。また、1台のSINKノードをCHと見立て、数台のセンサノードを末端センサノードとした部分的なクラスタを構築することで、簡易的にクラスタリングプロトコル向けのスリープモードの効果を評価する。1台のCHで管理される一部分の評価ではあるが、この部分ネットワークで有効性が示されれば、CHが複数存在する大規模な無線センサネットワークでもその効果は示されると考える。

4.2 簡易的なランダム方式の実装概要

ランダム方式で通信モジュールのスリープモードとアクティブモードの切り替えによって、実環境の無線センサネットワークの電力消費にどのような影響を与えるかを調べる。まず、無線センサネットワークのテストベッドとして世界的に利用されているMOTEプラットフォームのセンサノードMICAzを用いて、評価実験を行った。図7に評価実験環境を示す。センサノード1はスリープモードを実装していないセンサノードである。センサノード1は1秒間隔でセンシングを行い、センシングされたデータ(30Byte)を直ちにCHへ送信する。なお、通信モジュールのスリープモードがないため、通信モジュールは常にアクティブモードになる。一方、センサノード2, 3も1秒間隔でセンシングを行うが、センシングされたデータ(30Byte)をメモリに一時的に保存する。10秒周期でメモリに保存されている複数のデータを保存順ですべてCHへ送信する送信する。送信する前後合わせて3.5秒間のみ通信モジュールをアクティブモードにし、それ以外の時間はスリープモードになるように設定した。図8(a)にセンサノード1、図8(b)にセンサノード3, 4の通信モジュールの状態を示す。

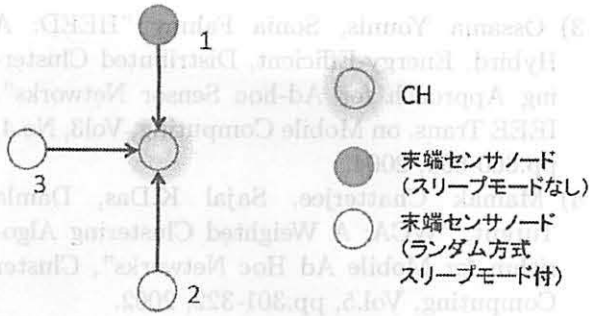
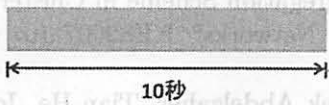
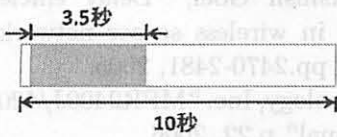


図7 実験の環境



(a) センサノード 1, 2 (スリープモードなし) の動作



(b) センサノード 3, 4 (簡易的なランダム方式スリープモードあり) の動作

□ スリープモード
■ アクティブモード

図8 簡易的なランダム方式スリープモード通信モジュールの動作

4.3 ライフタイムの定義

実験の評価対象はスリープモードを実装していないセンサノード1とランダム方式スリープモードを実装したセンサノード2, 3のライフタイムになる。

MICAzの有効電圧範囲は3600mV~2700mVである⁸⁾ため、センサノードの電圧は2700mVになるまでの時間をライフタイムと定義する。使用しているアルカリマンガン乾電池の初期電圧は電池毎に異なるが、すべて3200mV以上であったため、基礎実験で評価するライフタイムは電圧3200mVになってから2700mVになるまでの時間として評価する。

4.4 送信トラフィック量と消費電力の関係調査実験

MICAzセンサノードのトラフィック量とライフタイムの関係を示すため、センサノード1,2は0.5秒間隔、センサノード3,4は10秒間隔で90ByteのデータをCHに1ホップで送信する実験を行った。図9に各センサノードの送信量と電圧の関係を示す。図9では、センサノード3,4は、センサノード1,2と比べて、送信トラフィック量が圧倒的に少ないにも関わ

らず、ほぼ同じ電力を消費していたことがわかる。つまり、送信トラフィック量を削減しても、MOTEプラットフォームでは、常にデータ送受信のために通信モジュールがオンになっているため、センサノードのライフタイムを伸ばす効果はほとんどないことが分かった。

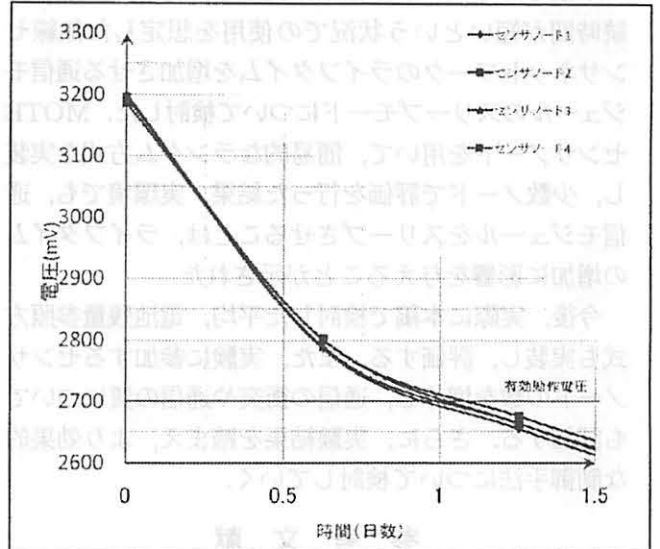


図9 異なる送信間隔の電圧と送信量の関係

4.5 簡易的なランダム方式スリープモードの実験結果

図10に各センサノードのライフタイムと電圧の関係を示す。ランダム方式スリープモードが実装されていないセンサノード1の場合、電圧が2700mVになるまでの時間は約1.5日である。一方、ランダム方式スリープモードが実装されているセンサノード2, 3の場合、電圧が2700mVになるまでかかった時間は

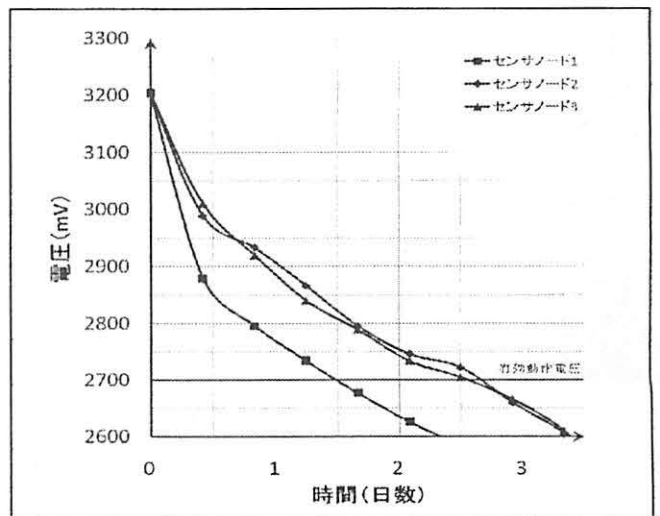


図10 簡易的なランダム方式スリープモードの実験結果

約 2.6 日である。つまり、MOTE プラットフォームにおいて通信モジュールのアクティブ時間を 35%程度になるような設定したセンサノードのライフタイムは約 1.7 倍になったことを確認できた。

5. ま と め

本稿ではイベントが頻繁に発生し、各イベントの持続時間が短いという状況での使用を想定した無線センサネットワークのライフタイムを増加させる通信モジュールのスリープモードについて検討した。MOTE センサノードを用いて、簡易的なランダム方式を実装し、少数ノードで評価を行った結果、実環境でも、通信モジュールをスリープさせることは、ライフタイムの増加に影響を与えることが示された。

今後、実際に本稿で検討した平均、電池残量参照方式も実装し、評価する。また、実験に参加するセンサノードの数を増やし、通信の衝突や通信の質についても評価する。さらに、実験結果を踏まえ、より効果的な制御手法について検討していく。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.

- 3) Ossama Younis, Sonia Fahmy "HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad-hoc Sensor Networks", *IEEE Trans. on Mobile Computing*, Vol3, No.4, pp.660-669, 2004.
- 4) Mainak Chatterjee, Sajal K. Das, Damla Turgut, "WCA: A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks", *Cluster Computing*, Vol.5, pp.301-322, 2002.
- 5) Yoshitsugu Obashi, Tomohiro Kokogawa, Yi Zheng, Huifang Chen, Hiroshi Mineno, Tadanori Mizuno, "Evaluation of Metadata-Based Data Aggregation Scheme in Clustering Wireless Sensor Networks" KES2007 (to appear).
- 6) Qing Cao, Tarek Abdelzaher, Tian He, John Stankovic, "Towards Optimal Sleep Scheduling in Sensor Networks for Rare-Event Detection" *IPSN2005*, pp.20-27, 2005.
- 7) Gang Lu, Narayanan Sadagopan, Bhaskar Krishnamachari, Ashish Goel, "Delay efficient sleep scheduling in wireless sensor networks" *INFOCOM2005*, pp.2470-2481, 2005.
- 8) Crossbow Technology, Inc. "MPR2400J/420/520 MIB User's Manual" p.22, 2006.