

無線センサネットワークのプロトコル評価を行うためのシミュレーションシステムの実装

安藤 洋規^{†1} クラ エリス^{†1} バロリ レオナルド^{†2}

大規模集積回路技術や、電力消費の少ない近距離無線通信技術の進歩により、小型かつ低コストな通信端末が登場している。そして、現在それらの端末を用いて構成する無線センサネットワークが注目されている。しかしながら、無線センサネットワークには、未だ解決しなければならない問題がいくつかある。中でも、クラスタリングにおけるクラスタヘッドの選出は、無線センサネットワーク内でのエネルギー分散へ与える影響が大きいため、適切なクラスタリングを行う必要がある。そこで本研究では、残存電力を考慮し、最適なクラスタリングを行うため、ファジィ理論を用いたファジィクラスタリングシステム (Fuzzy Clustering System:FCS) を提案する。提案システムでは、残存電力量及び、隣接ノード数、前ラウンドのクラスタヘッドまでの距離を入力パラメータに用いる。今回シミュレーションとして、FCS の有用性を確かめるため、MATLAB によるシミュレーションを行った。また、無線センサネットワークのプロトコルのうち、クラスタリングを行う LEACH プロトコルについても ns-2 によるシミュレーションを行った。現在、この FCS を ns-2 に実装中であり、今後 LEACH プロトコルとの比較・検討を行い、その有用性を確かめたい。

Implementation of a Simulation Systems for Clustering Algorithms in Wireless Sensor Networks

HIRONORI ANDO,^{†1} ELIS KULLA^{†1}
and LEONARD BAROLLI^{†1}

Sensor networks supported by recent technological advances in low power wireless communications along with silicon integration of various functionalities are emerging as a critically important computer class that enable novel and low cost applications. There are many fundamental problems that sensor network research will have to address in order to ensure a reasonable degree of cost and system quality. Cluster formation and cluster head selection are important problems in sensor network applications and can drastically affect the network's communication energy dissipation. However, selecting of the cluster head is not easy in different environments which may have different characteristics. In this work, in order to deal with this problem, we proposed a power reduction algorithm for sensor networks based on fuzzy logic and number of neighbor nodes. We call this algorithm Fuzzy Clustering System (FCS). We evaluate LEACH and FCS by some simulation results. Presently, we have implemented LEACH algorithm in NS-2. However, FCS is implemented in MATLAB. We are working to implement also FCS system in NS-2 in order to compare their performance.

1. はじめに

従来、環境モニタリングの分野においては、非常に高価な機器や人員が必要であり、莫大なコストがかかっていた。しかし、近年 IEEE802.11 や IEEE802.15 になどの無線通信技術が発展しており、リチウムイオン電池の登場による電源の大容量化かつ小型化、大規模集積回路技術の発展による基板面積の縮小・生産コストの低下に伴い、安価かつ小型な無線端末が登場している。そして、昨今その小型な無線端末にセンサ機能と、自立的なネットワークを構築する機能を追加した MICA z MOTE などの、無線センサネットワーク用端末が登場し、注目が集まっている。無線センサネットワークは、従来の環境モニタリング方法と比較して、設置条件やコスト等の点から非常に優れており、現在盛んに研究がおこなわれている¹⁾。また、ユビキタス社会の実現には不可欠な技術の一つとしても注目されている。無線センサネットワークを構成するセンサ端末は、非常に小型で設置場所の自由度が高く、例えば航空機によって観測点へばら撒くといった用途も考えられる。しかし、小型であるが故に、搭載できる電源への制約は大きく、電力が有限である。そのため、電力効率の良い通信手法の研究が盛んに行われている²⁾⁻⁵⁾。

電力効率のよい通信手法として、LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) プロトコル⁶⁾ のような、グループ内で代表ノードを決定し、その代表ノードが周辺ノードのデータをまとめて送信するという、クラスタリングを行う通信手法が挙げられる。しかし、LEACH プロトコルのクラスタリングアルゴリズムでは、残存電力の不均一化が生じる。そこで本研究では、LEACH プロトコルのクラスタリングアルゴリズムにおける、残存電力の不均一化を解決するためのクラスタリングシステムをファジィ理論を用いて、それを ns-2 に実装し、既存の LEACH プロトコルのクラスタリングアルゴリズムと比較・検討を行い、その有用性を評価する。

以降、2 節では無線センサネットワークにおけるクラスタリングの必要性について述べ、3 節では LEACH プロトコルにおけるクラスタリングについて紹介する。4 節ではファジィ

^{†1} 福岡工業大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology (FIT)

^{†2} 福岡工業大学情報工学部
Department of Information and Communication Engineering, Fukuoka Institute of Technology (FIT)

理論を用いたクラスタヘッド決定システムについて説明し、5節ではシミュレーションにより提案手法の有用性を示す。6節では本稿をまとめ、今後の課題について述べる。

2. クラスタリング手法

先でも述べたように、センサネットワークに用いる端末は、電池によって駆動するため電源は有限である。この限られた電力を如何に効率良く利用するかを考える上で重要となるのが、センサ端末のエネルギー消費モデルである。以下、式(1)に受信時、式(2)に送信時のセンサ端末のエネルギー消費モデルを示す。

$$E_R(k) = E_{elec} \cdot k \quad (1)$$

$$E_T(d, k) = E_{elec} \cdot k + \varepsilon_{amp} \cdot k \cdot d^2 \quad (2)$$

ここで E_{elec} [nj/bit] は送受信動作による消費電力、 ε_{amp} [nj/bit/m²] は信号増幅による消費電力、 k [bit] はパケットのサイズ、 d [m] は通信距離を表している。従って、式(2)から分かるように、データ送信時の消費電力は距離の2乗に比例するため、消費電力を抑えるためには距離の近いセンサノード同士で通信を行うことで、消費電力を抑えることが可能になる。

クラスタリングによるデータ収集の流れを図1に示す。無線センサネットワークにおけるクラスタリングとは、クラスタヘッドと呼ばれる代表ノードを選出し、そのクラスタヘッドを中心に、周辺ノードがクラスタというグループに分割される。そして、周辺ノードがクラスタヘッドへ自身が取得したデータを送信し、クラスタヘッドがまとめてシンクノードに送信する。これにより、センサノード同士による近距離通信を行うことが可能となり、各ノードがそれぞれシンクノードと通信を行ったときと比較して、電力の消費を抑えられる。

3. LEACH プロトコルのアルゴリズム

LEACH プロトコルの動作は、ラウンド単位で行われる。各ラウンドにおける動作は、クラスタ単位で管理・共有される。また、1ラウンドは、クラスタヘッド立候補フェーズ、クラスタ形成フェーズ、スケジュール形成フェーズ、情報通信フェーズの四つのフェーズから構成される。

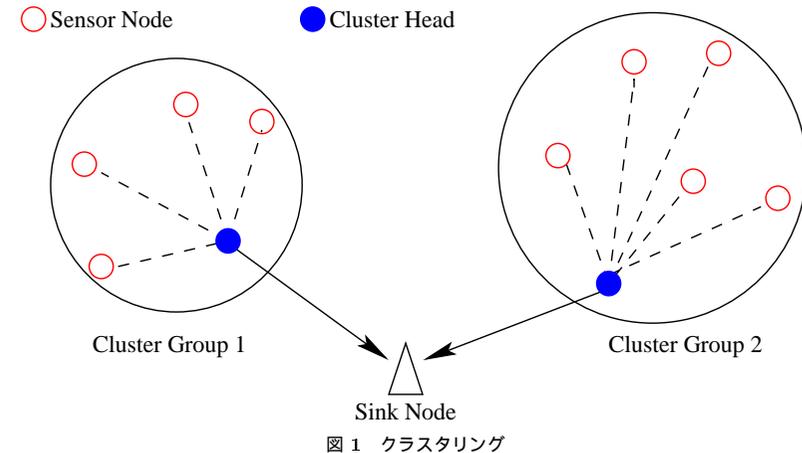


図1 クラスタリング

3.1 クラスタヘッド立候補フェーズ

各センサノードはそのラウンドで、自身がクラスタヘッドとして立候補するかどうかを最初に決定する。これには、式(3)を用いる。

$$T(i) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \cdot (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{if } i \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

無線センサネットワーク内の全センサノードに対するクラスタヘッドの割合を P 、現在のラウンドを r によって閾値を決定し、クラスタヘッドを確率的に決定する。クラスタヘッドは1ラウンドごとに交代し、クラスタの再構成が行われ、特定のセンサノードがクラスタヘッドであり続けることを防いでいる。過去 $1/P$ ラウンドにおいてクラスタヘッドになっていないセンサ数を G 、識別子が i である。センサ端末は、一様な乱数 $s (s \in [0, 1])$ を選択し、その上で閾値 $T(i)$ を計算する。

$s < T(i)$ の場合、センサノードはそのラウンドでクラスタヘッドとして立候補を行う。従って、閾値 $T(i)$ によって、ラウンド $0 (r = 0)$ では、各センサノードがクラスタヘッドに立候補する確率は P で、ラウンド 0 でクラスタヘッドになったセンサノードは、その後 $1/P$ ラウンドの間はクラスタヘッドに選出されなくなる。さらに、各センサノードは $1/P$ ラウンド中に必ず一度はクラスタヘッドとして選出されるため、 $1/P$ ラウンド経過後にす

すべてのセンサノードは初期状態の $0(r = 0)$ に戻る。

3.2 クラスタ形成フェーズ

クラスタヘッドに立候補したセンサノードは、自分がクラスタヘッドに立候補したことを周囲のセンサノードに知らせるために、ブロードキャストを行う。このブロードキャストには、CSMA が用いられ、すべてのクラスタヘッドは同じ送信エネルギーでブロードキャストを行う。クラスタヘッド以外のセンサノードは、そのブロードキャスト信号の強度を観測し、強度が強いほど隣接していると考えられ、情報を送信する際に必要な電力量が小さい。そのため、ブロードキャスト信号の強度を用いて、クラスタヘッド以外のセンサノードは自身が所属するクラスタを決定する。

3.3 スケジュール形成フェーズ

各センサノードは、自身が所属するクラスタが決定した後に、所属するクラスタのクラスタヘッドに対して、自身がクラスタのメンバーとして参加するという情報を、クラスタヘッドに対して送信する。クラスタヘッドは、受け取った情報を元に、クラスタメンバーとなったセンサノードに対して、クラスタ内で情報通信を行うのに用いる、TDMA スケジュールをブロードキャストする。

3.4 情報通信フェーズ

各センサノードは、クラスタが形成され、TDMA スケジュールが決定すると、情報通信可能な状態となり、TDMA スケジュールに定められたタイミングによって、クラスタヘッドへ各センサノードが取得した情報を送信する。この際に、クラスタ形成フェーズにて、観測した信号の強度を元に、適切な送信電力で送信する。クラスタヘッドは、自身のクラスタに所属する全てのセンサノードから情報を受け取ると、受信した情報を圧縮・集約し、シンクノードへと送信する。

4. 提案手法

LEACH プロトコルでは、閾値 $T(i)$ を用いて、無線ネットワーク内におけるクラスタヘッドを確率的に選出・変更している。非常に簡潔な方法のため、クラスタヘッドを選出際のオーバーヘッドが低い点が魅力であるが、各センサノードにおいて、自身の周辺の状況変化等を考慮しておらず、残存電力等の面からみると、必ずしも最適なクラスタヘッドの選出が行われていない。そこで、本研究では、LEACH プロトコルの問題点である、残存電力の不均一

化を解決するために、ファジィクラスタリングシステム (Fuzzy Clustering System:FCL) を ns-2 へ実装する。FCS への入力パラメータとして、

- Remaining Battery Power of Sensor(RPS)
- Degree o Number Neighbor Nodes(D3N)
- Distance from Cluster Centroid(DCC)

の 3 つのパラメータを与える。1 つ目のパラメータが残存電力量、2 つ目のパラメータが隣接ノード数、3 つ目のパラメータがセンサノードから前ラウンドにおけるクラスタヘッドまでの距離を表している。これにより、各センサノードの残存電力量を考慮することが可能となる。また、隣接ノード数及び、前ラウンドのクラスタヘッドまでの距離を考慮することにより、少ないクラスタヘッド数で済ます事が可能になる。これにより、電力を大量に消費するクラスタヘッド数の最適化を行い、無線センサネットワーク全体で電力を節約することができ、ネットワークの稼働時間を伸ばすことが可能となる。3 つの入力から出力されるパラメータを、Probability of Cluster Head Selection(PCHS) と表し、これはそのセンサノードがクラスタヘッドへ選ばれる確率を表している。表 1 に FCS における入出力パラメータおよび分割レベルを示す。

表 1 提案手法におけるパラメータおよび分割レベル

| Parameter | Level |
|---------------------------------------|--|
| Remaining Battery Power of Sensor | Low, Middle, High |
| Degree of Number Neighbor Nodes | Few, Medium, Many |
| Distance from Cluster Centroid | Light, Moderate, Heavy |
| Probability of Cluster Head Selection | Very Weak, Weak, Little Weak, Midium, Little Strong, Strong, Very Strong |

以下、本稿では各パラメータのレベル名を省略し、次のように表記する。

- RPS = Low(Lo), Middle(Mi), High(Hg)
- D3N = Few(Fw), Medium(Me), Many(mn)
- DCC = Far(Fr), Moderate(Mo), Near(Nr)
- PCHS = Very Weak(VW), Weak(W), Little Weak(LW), Medium(MD), Little Strong(LS), Strong(S), Very Strong(VS)

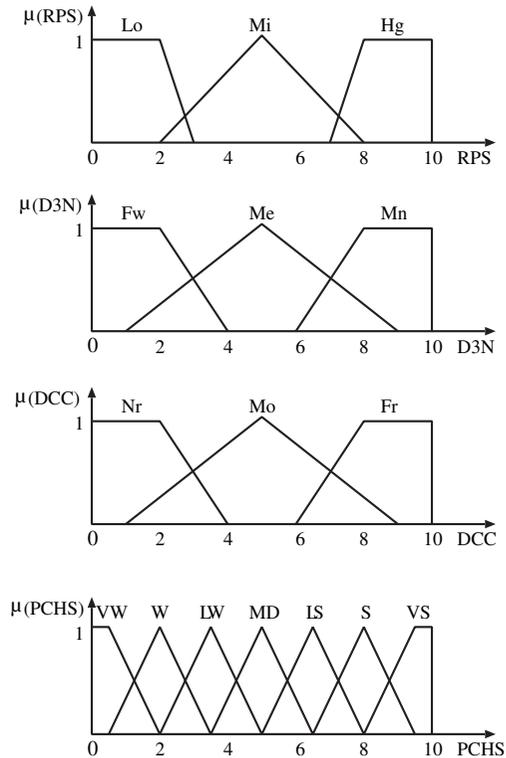


図 2 提案手法におけるメンバーシップ関数

4.1 メンバーシップ関数

FCS における三つの入力パラメータと一つの出力パラメータに関するメンバーシップ関数を、図 2 に示す。

各関数は、表 1 のパラメータおよび分割レベルに対応しており、上からセンサノードの残存電力量に関するメンバーシップ関数、隣接ノード数に関するメンバーシップ関数、クラスタの中心からノードまでの距離に関するメンバーシップ関数、クラスタヘッドを決定するための指標に関するメンバーシップ関数となっている。FCS で使用しているファジィルールを表 2 に示す。ここまでで、説明したファジィシステムを用いたクラスタリングシステムが FCS である。図 3 に FCS を示す。

表 2 提案手法におけるファジィルールベース

| Rule | RPS | D3N | DCC | PCHS |
|------|-----|-----|-----|------|
| 1 | Lo | Fw | Fr | VW |
| 2 | Lo | Fw | Mo | W |
| 3 | Lo | Fw | Nr | W |
| 4 | Lo | Me | Fr | W |
| 5 | Lo | Me | Mo | W |
| 6 | Lo | Me | Nr | W |
| 7 | Lo | Mn | Fr | VW |
| 8 | Lo | Mn | Mo | VW |
| 9 | Lo | Mn | Nr | VW |
| 10 | Mi | Fw | Fr | W |
| 11 | Mi | Fw | Mo | LW |
| 12 | Mi | Fw | Nr | MD |
| 13 | Mi | Me | Fr | LW |
| 14 | Mi | Me | Mo | MD |
| 15 | Mi | Me | Nr | LS |
| 16 | Mi | Mn | Fr | MD |
| 17 | Mi | Mn | Mo | LS |
| 18 | Mi | Mn | Nr | S |
| 19 | Hg | Fw | Fr | LW |
| 20 | Hg | Fw | Mo | MD |
| 21 | Hg | Fw | Nr | LS |
| 22 | Hg | Me | Fr | MD |
| 23 | Hg | Me | Mo | LS |
| 24 | Hg | Me | Nr | S |
| 25 | Hg | Mn | Fr | LS |
| 26 | Hg | Mn | Mo | S |
| 27 | Hg | Mn | Nr | VS |

図 3 で示すように、LEACH プロトコルおよび FCS は ne-2 上にて動作する。

5. シミュレーション

今回 2 つのシミュレーションを行った。まず最初に、作成した FCS の挙動を確かめるための、シミュレーションを行った。結果を図 4 および図 5 に示す。図 4 では、残存電力が少なく、周辺のノード数が 7 以上あるセンサノードが、クラスタヘッドに選出される確率が低くなっているのが確認できる。これは、自身の残存電力が少ないため、周辺の残存電力の多いノードにクラスタヘッドを任せればよいためである。また図 5 では、残存電力が少な

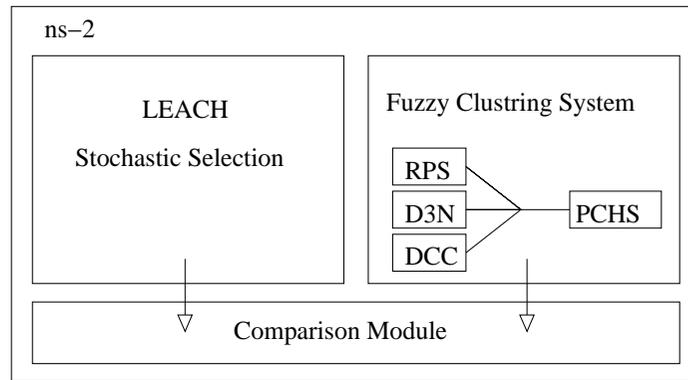


図 3 FCS

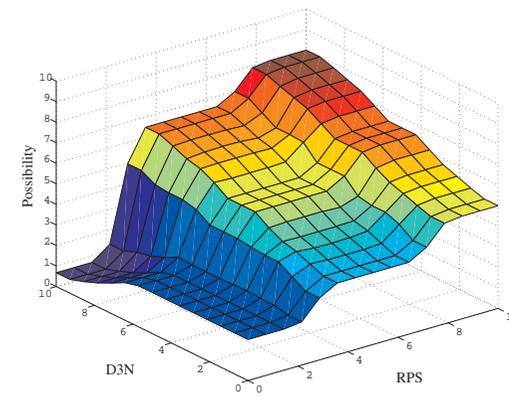


図 4 残存電力量及び周辺ノード数による評価

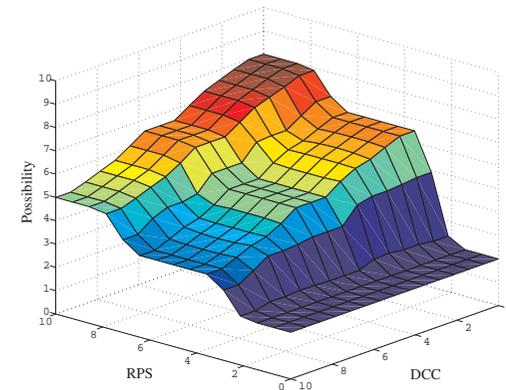


図 5 残存電力量及び前ラウンドのクラスタヘッドまでの距離による評価

い時、前ラウンドのクラスタヘッドまでの距離に関係なく、クラスタヘッドに選出される確率は低くなっている。この結果より、FCS は、残存電力に重みを付けたクラスタリングアルゴリズムであり、残存電力の不均一化を解消するために、最適なクラスタリングが可能になっている。

次に、LEACH プロトコルにおいてシミュレーションを行った。シミュレーション条件を下記に示す。

- ノード数：20
- ノードの配置：ランダム
- シンクノードの位置：(0, 50)
- 範囲：100m × 100m
- シミュレーション時間：1000 秒
- シミュレーション回数：50 回

図 6 は、通常の LEACH プロトコルにてシミュレーションを行った結果である。さらに、図 7 は意図的に通信を行わせないようにし、各ノードがセンシング機能だけを行った場合に、一体どれくらい時間、ノードが生存できるかをシミュレーションした結果である。この結果より、センサノードは通信を行わなくても、このシミュレーション条件では、約 615 秒で活動を停止することがわかった。また、図 6 より通常の LEACH においても、615 秒

まで生存しているノードが確認できる。これはシミュレーション開始時から既に、当該センサノードの通信可能範囲内に、通信可能なセンサノードが存在しなかったか、早期に周辺のノードが活動を停止し、他のノードと通信を行うことができなくなっているためと考えられる。

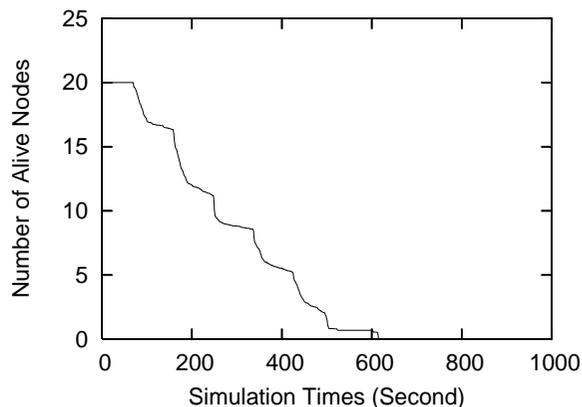


図 6 LEACH

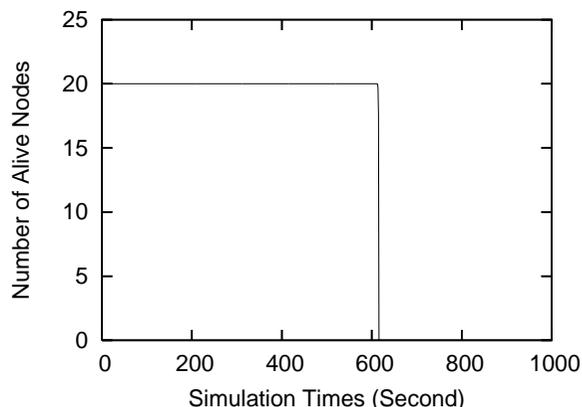


図 7 LEACH without communication

6. む す び

今回本稿では、残存電力の不均一化を解消するために、残存電力量からみて最適なクラスタリングが行える FCS について提案を行った。また、FCS の有用性を示すための、シミュレーションを行い、残存電力量と隣接ノード数を用いたシミュレーションでは、残存電力が

少なく、周辺のノード数が 7 以上あるセンサノードが、クラスタヘッドに選出される確率が低くなっており、また残存電力量と前ラウンドのクラスタヘッドまでの距離を用いたシミュレーションでは、残存電力が少ない時、前ラウンドのクラスタヘッドまでの距離に関係なく、クラスタヘッドに選出される確率は低くなっている。この結果より、残存電力を考慮した最適なクラスタリングが行えることを示した。また、クラスタリングを行う LEACH プロトコルについてもシミュレーションを行い、そのノードの減少傾向を示した。現在、この FCS を ns-2 上へ実装中であり、既存の LEACH プロトコルとの比較を行うためのシミュレーションシステムの構築を行っている。今後 FCS の実装を行った後、他の無線センサネットワークプロトコルとも比較が行えるようにし、他の無線センサネットワークプロトコルとの評価を行っていく際の評価基準の策定も行っていきたい。

参 考 文 献

- 1) 戸辺義人：無線センサネットワークの技術動向, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J90-B, No.8, pp. 711-719 (2007).
- 2) Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E.: Wireless sensor networks: a survey, *Computer Networks*, Vol.38, No.4, pp. 393-442 (2002).
- 3) Akyildiz, I.F. and Kasimoglu, I.H.: Wireless sensor and actor networks: research challenges, *Ad Hoc Networks*, Vol.2, No.4, pp. 351-367 (2004).
- 4) Giordano, S. and Rosenberg, C.: Topics in ad hoc and sensor networks, *IEEE Communication Magazine*, Vol.44, No.4, pp. 97-97 (2006).
- 5) Al-Karaki, J.N. and Kamal, A.E.: Routing techniques in wireless sensor networks: a survey, *IEEE Wireless Communication*, Vol.11, No.6, pp. 6-28 (2004).
- 6) Handy, M.J., Haase, M. and Timmermann, D.: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-head Selection, *Proc. of the 4th IEEE Conference on Mobile and Wireless Communications Networks (MWCN)*, pp. 368-372 (2002).