

衝突回避を目的としたセンサネットワーク用 経路制御及びアクセス制御手法

新家 晃 内藤 克浩
森 香津夫 小林 英雄

センサネットワークは小型センサノードにより構成されるネットワークである。センサノードの資源は限られているため、現実のセンサノードへの実装においては、簡易なプロトコルが要求される。また、センサネットワークで使用される通信デバイスの帯域も限られているため、イベント検出、定期観測、SINK ノードからの情報収集クエリなどにより、多数のセンサノードがほぼ同時にデータパケットを送信することがある。そのため、センサネットワークではパケット衝突が発生する傾向が高い。本稿では、近隣センサノード間でのみ経路情報を交換する簡易な経路制御方式を提案する。提案方式ではパケットの目的毎に送信時間を分離する独自野路間分割型フレーム構造を採用することにより、パケット衝突数を削減する。評価結果より、提案方式を用いることにより、少ない経路制御パケット数で信頼性の高いセンサネットワークを実現できることを示す。

Routing and Media Access Control Schemes for Collision Avoidance in Wireless Sensor Networks

AKIRA NIINOMI, KATSUHIRO NAITO, KAZUO MORI
and HIDEO KOBAYASHI

Wireless sensor networks consist of small sensor nodes. Resource of wireless sensor nodes is limited. Therefore, a simple protocol is suitable to implement on real sensor nodes. Moreover, bandwidth of communication device for wireless sensor networks is limited. Additionally, a lot of sensor nodes transmit data packets at same instant according to correspond event detection, periodic timer, data collection query from sink nodes. Hence, packet collisions tend to occur in sensor networks. In the proposed mechanisms, we propose a simple routing protocol that exchanges routing information between neighbor sensor nodes. Moreover, we employ an original frame structure that separate transmission timing for different purposes of packets to reduce packet collisions. From

the simulation results, it is shown that the proposed mechanisms can achieve a reliable wireless sensor networks with a few numbers of control packets.

1. ま え が き

近年データ収集用ネットワークとして、センサネットワークが注目されている。センサネットワークでは多数のセンサ付き無線端末（センサノード）を広範囲に設置し、各センサノードが SINK ノードと呼ばれるデータ集約端末に向けてデータを送信することにより、周辺環境などを調査することが可能となる。一般に、センサノードの通信範囲は限られているため、SINK ノードまで情報を届けるためにマルチホップ通信が用いられる。また、センサノードはバッテリー駆動であることが多く、メンテナンスが難しい場所に配置されることも予想されるため、ネットワークの長期間稼働を実現するには、センサノードの省電力化が重要な課題となる^{1),2)}。

この課題に対してこれまでに様々な研究がなされており、アクセス制御の観点での研究と経路制御の観点での研究に大別される。アクセス制御に関する研究では、センサノードが定期的に省電力状態に移行する方法が提案されており、センサノード寿命の延長に有効であることが知られている³⁾⁻⁶⁾。また、経路制御に関する研究では、観測情報を SINK ノードに転送するために必要となる電力を最小化する経路を探索する方法^{7),8)}、各センサノードの消費電力を均等にすることでネットワーク全体の稼働時間を伸ばす方法などが考えられている⁹⁾⁻¹²⁾。

これらの経路制御では、最適な経路を見つけるために様々な種類の制御パケットをネットワーク内で交換する必要がある。これらの制御パケットは通常フラディングにより伝送され、その結果、多量の制御パケットを発生させて、大きなオーバーヘッドとなる。また、最適な経路を見つけるためには複雑な計算を行う必要があり、実環境での実現はセンサノード及び無線帯域などの資源の制約から困難となる場合も想定される。そこで、本稿では実際のセンサノードに実装することを想定し、従来法の問題点である制御パケット数の増大を抑制し、かつ、複雑な計算を要しない簡易な経路制御方式を提案する。

本稿では、センサノードがイベント検知や定期観測などによりデータ収集を行うセンサネットワークを対象としている。そのため、近隣のセンサノードの通信開始時刻に相関があると考えられ、パケット衝突を防ぐ枠組みは重要となる。そこで、提案方式ではネットワーク層の経路制御とメディアアクセス層の送信時間制御を包括して制御するクロスレイヤメカ

ニズムについて検討を進める。

本稿で提案する独自の簡易経路制御方式では、各センサノードが近隣の上流側（SINK ノードに向かう側）のセンサノードと経路情報を交換することにより、当該センサノードから SINK ノードへの経路を構築する。また、SINK ノードへの経路を有しているセンサノードは下流側（SINK ノードから遠ざかる側）のセンサノードに経路を通知することにより、下流側に経路を拡張する。この結果、提案する経路制御方式では、SINK ノードを頂点としたツリー型の経路が構築される。また、提案する送信時間制御方式では、独自のフレーム構造を用いることにより、パケット種別及び SINK ノードからのセンサノードまでのホップ数に基づいて当該ノードにおけるフレーム内の通信期間を制限する。これにより、異なるホップ数を持つセンサノード間ではパケット衝突を完全に回避できる。シミュレーション結果より、提案方式は制御パケット数の抑制と高い情報収集率の両立が可能であることを示す。

2. 衝突回避を目的としたセンサネットワーク用プロトコル

本章では提案法についてアクセス制御、経路制御に分けて説明する。本研究ではセンサノードが定期的にデータを SINK ノードしてデータ収集を行うシステムを考える。SINK ノードはデータを受信した場合、確認応答をデータの送信先のセンサノードに返し、センサノードは SINK ノードから確認応答を受信できない場合データの再送を行う。

2.1 アクセス制御

提案方式では、図 1 に示されるいくつかの時間スロットで構成されるフレームを採用することにより、通信目的及び SINK ノードからセンサノードまでのホップ数に基づいて各ノードが利用可能な時間スロットを制限する。フレームは、経路要求スロット、経路応答スロット、データスロットと確認応答スロットから構成される。なお、ネットワークで想定する最大ホップ数を N とし、フレーム内に N 個のデータスロットと確認応答スロットを定義する。各センサノードは送信するパケットの種類や SINK ノードからのホップ数によりパケット送信が可能なスロットが定められており、定められたスロット時間内でのみパケット送信が可能である。

センサノードがパケット送信を行う際、当該センサノードの利用可能な各スロット期間内でランダム遅延時間後にパケット送信を行う、これにより同一スロット期間内で異なるセンサノードから送信されるパケットが衝突することを防ぐ。以下に各スロットの詳細を記す。

2.1.1 経路要求スロット

センサノードが有効な経路を持たない場合、近隣センサノードに対して、当該センサノ

ードが経路探索のための制御パケットをブロードキャストを用いて送信するためのスロットである。

2.1.2 経路応答スロット

経路要求スロットにおいて近隣センサノードより経路探索のための制御パケットを受信した場合、有効経路を持つセンサノードが、有効経路のホップ数を経路応答パケットにより返信するためのスロットである。

2.1.3 データスロット

センサノードが SINK ノードに向けて観測情報を含んだデータパケットを送信、転送するためのスロットである。スロットは SINK ノードからのホップ数 n に応じてサブスロットに分割される。各サブスロットでは当該センサノードが自身のデータパケットと下流センサノードのデータパケットを次ホップの上流センサノードへ送信する。1 フレーム内で全センサノードのデータパケットを SINK ノードへ送信するために、ホップ数が多い下流のセンサノード用スロットをフレームの前方に配置し、ホップ数が少ない上流のセンサノード用スロットを後方に配置する。ホップ数により送信時間を分けることで、異なるホップ数のセンサノード間のパケット衝突数の削減が可能となる。

2.1.4 確認応答スロット

SINK ノードに到着したデータパケットに対して、データを SINK ノードが受信したことを通知する確認応答パケットを送信、転送するためのスロットである。スロットは SINK ノードからのホップ数 n に応じてサブスロットに分割される。各サブスロットでは当該センサノードが自身の下流センサノード宛の確認応答パケットを次ホップの下流センサノードへ送信する。1 フレーム内で全センサノードへ確認応答パケットを送信するために、ホップ数が少ない上流のセンサノード用スロットをフレームの前方に配置し、ホップ数が多い下流のセンサノード用スロットを後方に配置する。データスロットと同様にホップ数により送信時間を分けることにより、パケット衝突数の削減が可能となる。

2.2 経路制御

提案方式では制御パケット数削減のために、制御パケットの転送を必要としない経路制御を導入する。これによりフラディングを用いた従来法と比較し大幅な制御パケット数の削減が見込める。以下に経路制御の詳細について記す。

2.2.1 経路制御パケット

提案方式では 2 種類の経路制御パケットを用いて経路構築を行う。

- 経路要求 (RREQ: Route Request) パケット

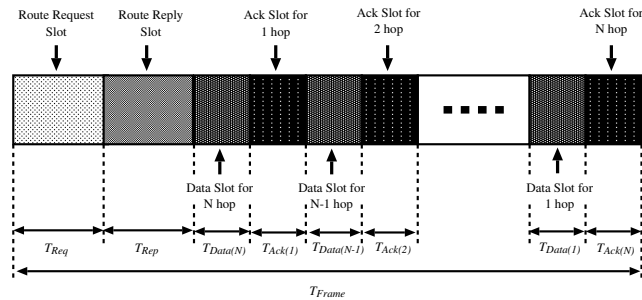


図1 フレームフォーマット.
Fig. 1 Frame format.

RREQ パケットは、センサノードが SINK ノードまでの有効な経路を持たない場合、近隣センサノードに対して経路要求を行うために用いる制御パケットである。

● 経路応答 (RREP : Route Reply) パケット

RREP パケットは、RREQ パケットを受信したセンサノードが SINK ノードまでの有効な経路を持っている場合にそのホップ数を RREQ パケットの送信元センサノードに返信する際に用いる制御パケットである。

2.2.2 経路構築手順

提案方式では、有効な経路を持たないセンサノードは、近隣のセンサノードに向けて RREQ パケットを経路要求スロットでブロードキャストする。次に RREQ パケットを受信した有効な経路を持つ近隣のセンサノードは、RREQ パケットを送信したセンサノードに対して RREP パケットを経路応答スロットで返信する。RREP パケットを受信したセンサノードは、RREP パケットを返信したセンサノードに対して経路構築を行う。センサノードが複数の RREP パケットを受信した場合、最小のホップ数のものを選択する。また、最小のホップ数の RREP パケットが複数受信された場合は、その中で最も早く受信されたものを選択する。表 1 はセンサノードが持つ経路テーブル例である。経路テーブルは目的地のアドレス、目的地までのホップ数、次ホップのアドレス、経路のライフタイム、アクティベーションフラグによって構成される。経路テーブルは RREP パケットを受信する度に更新される。

上記の動作を繰り返し行うことにより、上流ノードから下流ノードへと経路情報を伝搬していくことができる。これにより制御パケットの転送を行うことなく経路構築ができ、制御パケット数の削減が可能となる。

2.2.3 経路再構築

提案方式ではデータパケットを送信した後の SINK ノードからの確認応答パケットが k 回確認できない場合、その経路を無効とし経路の再構築を行う。経路の再構築は上記の経路構築手順と同様に行う。

3. 動作例

提案方式を用いた場合の経路構築とデータ送信の動作例について述べる。本例では、図 2 のようなセンサノード配置を仮定する。図 2 では、センサノードは点線で記載されているセンサノードとのみ通信できるものとする。また、最大ホップ数 $N = 3$ とした。

3.1 経路構築

図 2 のセンサノード配置の場合の経路構築例を図 3 に示す。図 3 では、ブロードキャストパケットを細い実線の矢印で記し、ユニキャストパケットを太い実線の矢印で記す。なお、破線で記されている矢印は、宛先センサノードが自ノードではないが受信可能なユニキャストパケットを示している。

図 3 では最初、全ノードが有効な経路を持たないため (SINK ノードは有効な経路を持っていると考える)、経路要求スロットにおいて、センサノード 1 ~ 5 が近隣センサノードに向けて、RREQ パケットのブロードキャストを行う。次に有効な経路を所持している SINK ノードが、センサノード 1 及び 2 に向けて RREP パケットをユニキャストで返信する。なお、センサノード 1 ~ 5 も RREQ パケットを受信しているが有効な経路を持たないため、RREP パケットの返信は行わない。RREP パケットを受信したセンサノードは経路テーブルに経路情報を書き込む。1 フレームの動作でここまでの動作が実施され、SINK ノードから 1 ホップのセンサノードの経路構築が完了する。次フレームの経路要求スロットでは、経路を持たないセンサノード 3, 4, 5 が RREQ パケットを再びブロードキャストする。経路応答スロットにおいて前フレームで経路情報を獲得したセンサノード 1, 2 がそれぞれセンサノード 3 に RREP パケットをユニキャストで返信する。センサノード 3 では最初に受信したセンサノード 1 の経路をテーブルに書き込む。後続フレームにおいても、同様の動作を行いセンサノード 4 及びセンサノード 5 が経路情報を得る。提案方式ではこのような動作に従い SINK ノードに近いセンサノードから順に経路構築を行う。また、近隣センサノードのみと制御パケットの交換を行うため、制御パケット数を削減することが可能となる。

3.2 データ及び確認応答送信

図 5 に、図 2 のセンサノード配置を仮定した場合のデータ送信手順例を示す。図 5 では、

表 1 経路テーブル.
Table 1 Routing table.

Destination	-
Hop Count	-
Next Hop	-
Life Time	-
Activated	-

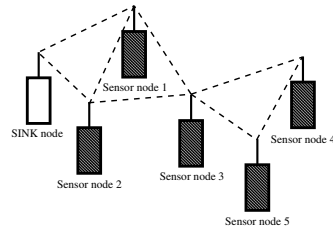


図 2 センサード配置.
Fig.2 Sensor node location.

ユニキャストパケットを太い実線で記し、宛先が自ノードではないが受信可能なユニキャストパケットを破線で記している。また、図 4 のような経路構築が行われたとする。

図 5 では、3 ホップ用のデータスロットにおいて、センサード 4 及び 5 がセンサード 3 に向けてデータを送信する。次に 2 ホップ用のデータスロットにおいて、センサード 3 がセンサード 2 に向けて、自らのデータとセンサード 4 及びセンサード 5 のデータを送信する。最後に 1 ホップ用のデータスロットにおいて、センサード 1 及びセンサード 2 が SINK ノードにデータを送信する。センサード 1 は自らのデータとセンサード 3, 4, 5 のデータを送信する。このようにしてデータの収集を行う。

次フレームで SINK ノードは 1 ホップ用の確認応答スロットにおいて、センサード 1 及び 2 に向けて確認応答パケットの送信を行う。なお、SINK ノードはセンサード 1 に対して、センサード 3, 4, 5 宛の確認応答パケットも送信する。次の 2 ホップ用の確認応答スロットにおいてセンサード 1 は SINK ノードからの確認応答パケットをセンサード 3 へ転送する。最後に 3 ホップ用の確認応答スロットにおいてセンサード 3 はセンサード 4, 5 に確認応答パケットを転送する。上記動作により、各センサードは自らの送信したデータパケットが SINK ノードに到着したことを確認可能となる。なお、確認応答パケットを受信できない場合、次フレームにおいてデータパケットの再送を行う。

4. シミュレーション結果

提案方式の性能を評価するために、既存方式である AODV¹³⁾ と比較評価を行った。評価にはネットワークシミュレータ QualNet¹⁴⁾ を使い、表 2 に示すシミュレーション諸元を用いた。

図 6 はデータ送信あたりに要した経路制御パケット数である。結果より経路構築時の制

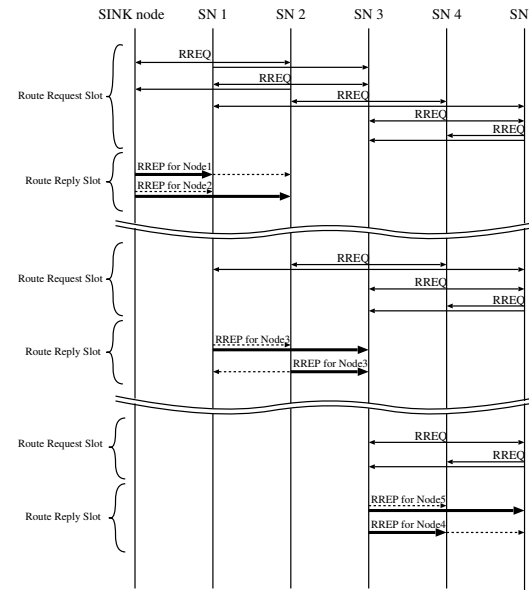


図 3 経路構築手順.
Fig.3 Route construction process.

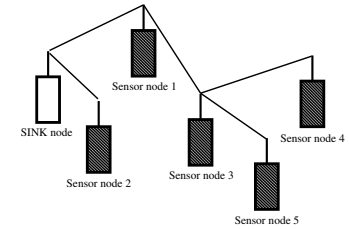


図 4 経路例.
Fig.4 Route example.

御パケットの大幅な削減が確認できる。既存方式の AODV が経路構築時に制御パケットのフラッディングを行っているため、センサード数が増えた場合にパケット数が増大する。一方、提案方式では制御パケットを近隣センサードにのみ送信するために制御パケットの数を削減することができたと考えられる。

次に図 7 に情報収集率を示す。情報収集率は SINK ノードのデータ受信数をセンサードのデータ送信数で正規化した値である。AODV ではセンサードが増えると情報収集率の減少が見られるが、提案方式ではセンサード数が増えた場合にも高い情報収集率を維持していることが確認できる。提案方式ではホップ数による送信時間制御によりパケット衝突数が減少し、情報収集率が向上したと考えられる。

図 8 にシミュレーション時間内のセンサードあたりの再送回数を示す。結果より、提案方式の再送回数は AODV と比較して減少していることが分かる。これは図 7 から確認できるように、提案方式の情報収集率が高いためデータを再送する必要性が低くなったため

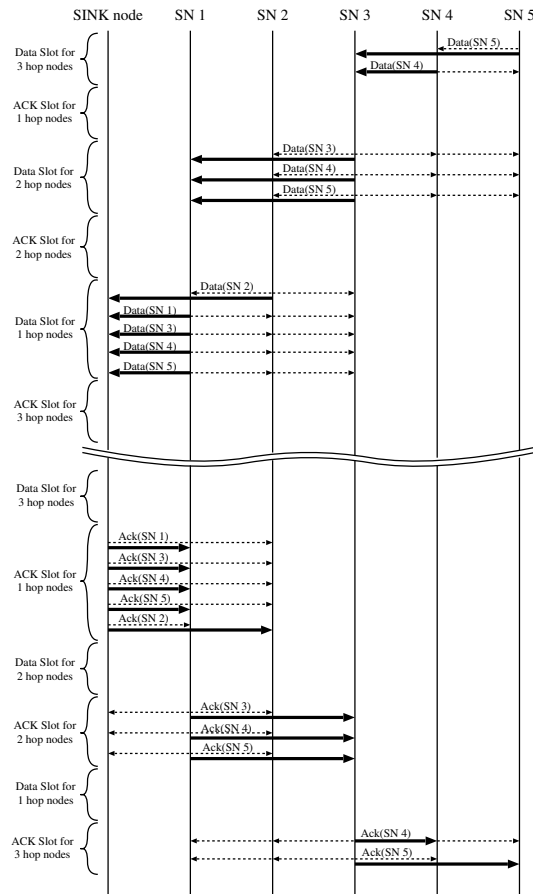


図 5 データ及び確認応答送信手順.
Fig. 5 Data and Acknowledgement transmission.

表 2 シミュレーション諸元.
Table 2 Simulation conditions.

Simulator	Qualnet
Simulation time	24 [h]
Simulation trial	100 [times]
Field size	1000 × 1000 [m]
Number of nodes	50 - 300 [nodes]
Node placement	uniform
Node mobility	None
Wireless device	IEEE 802.11.b
Transmission rate	2M [bps]
Transmission range	370 [m]
Propagation model	Free space
Wireless environment	AWGN
Data transmission interval	360 [s]
T_{Frame}	60 [s]
T_{Req}	10 [s]
T_{Rep}	10 [s]
$T_{Data}(n)$	4 [s]
$T_{Ack}(n)$	4 [s]
Maximum hops N	10 [hop]
Lifetime of route	600 [s]

5. ま と め

本稿では実働環境を考慮したセンサネットワークに適したクロスレイヤメカニズムを提案した。提案方式では、経路制御パケットを近隣センサノードとのみ交換することにより、制御パケット数を削減可能な経路制御方式を採用した。また、通信目的及び SINK ノードからのホップ数情報に基づいたスロット期間をフレーム内に構成することにより、制御パケット及びデータ収集に関するパケットの衝突を抑制した。評価結果より提案方式を用いることで、経路制御パケット数の大幅な削減と極めて高い情報収集率を達成可能であることを示した。

謝 辞

本研究の一部は財団法人電気通信普及財団研究調査助成を受けて行われたものである。記して謝意を表する。

ある。

図 9 にネットワーク内で構築された経路の平均ホップ数を示す。結果から提案方式が AODV よりも平均ホップ数が多いことが分かる。これは提案方式では、ホップ毎の経路構築を行うため、冗長なセンサノードが経路内に含まれている可能性があるためだと考えられる。

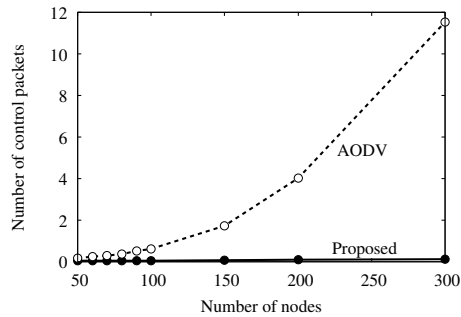


図 6 制御パケット数.

Fig. 6 Number of control packets.

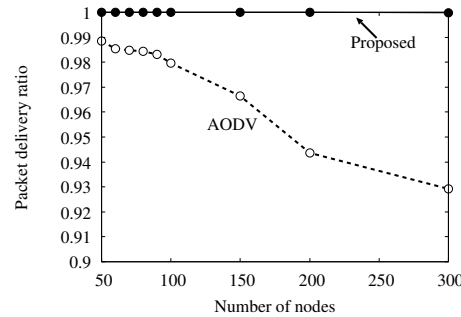


図 7 情報収集率.

Fig. 7 Information collection ratio.

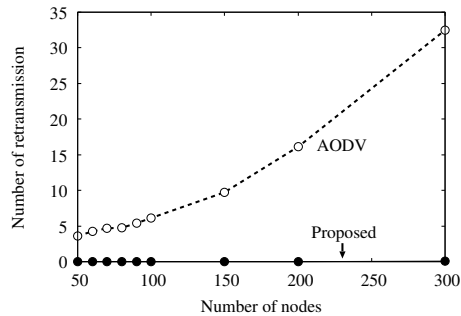


図 8 再送回数.

Fig. 8 Retransmission ratio.

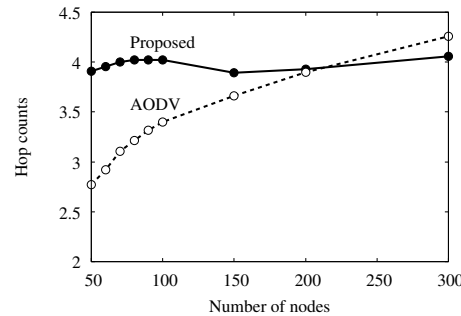


図 9 平均ホップ数.

Fig. 9 Average hop counts.

参考文献

- 1) I.F.Akyildiz, W.Su, Y.Sankarasubramaniam, and E.Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102 – 104, Aug. 2002.
- 2) D.Ganesan, A.Cerpa, W.Ye, YanYu, J.Zhao, and D.Estrin, "Networking issues in wireless sensor networks," *ACM Journal of Parallel and Distributed Computing*, Vol. 64, No. 7, pp. 799 – 814, Jul. 2004.
- 3) W.Ye, J.Heidemann, and D.Estrin, "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Trans. Net.*, vol. 12,

no. 3, pp. 493 – 506, Jun. 2004.

- 4) El-Hoiydi, "Spatial TDMA and CSMA with Preamble Sampling for Low Power Ad Hoc Wireless Sensor Networks," *Proc. ISCC 2002*, pp. 685 – 92, Jul. 2002.
- 5) V. Rajendran, K. Obraczka, and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks," *Proc. ACM SenSys 03*, Pages.181–192, Nov. 2003.
- 6) C.C.Enz, A.El-Hoiydi, J-D.Decotignie, and V.Peiris, "WiseNET: An Ultralow-Power Wireless Sensor Network Solution," *IEEE Computer*, Volume. 37, Issue. 8, Aug. 2004.
- 7) Q.Cao, T.He, L.Fang, T.F.Abdelzaher, J.A.Stankovic, and S.Son, "Efficiency Centric Communication Model for Wireless Sensor Networks," *Proc. IEEE INFOCOM 2006*, 2006.
- 8) J.-H.Chang and L.Tassiulas, "Maximum lifetime routing in wireless sensor networks," in *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 12, no. 4, pp. 609 – 619, Aug. 2004.
- 9) C.-S.Ok, P.Mitra, S. Lee, and S. Kumara, "Distributed Energy Balanced Routing for Wireless Sensor Networks," *Computers & Industrial Engineering*, 2007.
- 10) R. Madan and S. Lall, "Distributed Algorithms for Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 5, no. 8, pp. 2185 – 2193, Aug. 2006.
- 11) J. Gao and L. Zhang, "Load Balanced Short Path Routing in Wireless Networks," *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, special issue on Localized Comm., vol. 17, no. 4, pp. 377 – 388, Apr. 2006.
- 12) G. Yang, J. Zheng, J. Shi, H. Chen, "Energy Balance Hierarchical Data Aggregation Mechanism for Wireless Sensor Network," *WASE International Conference on Information Engineering 2009*, vol. 1, pp.310 – 313, 2009.
- 13) C. E. Perkins, E. M. Belding-Royer, and S. Das. "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," *IETF RFC 3561*, Jul. 2003.
- 14) Network Simulator Qualnet is <http://www.scalable-networks.com/>