

センサノードのバッファ残量予測を用いたロスの少ないデータ収集プロトコルの提案

稲垣 彰祐^{†1} 森 駿介^{†1,†2} 梅津 高朗^{†1,†3}
山口 弘純^{†1,†3} 東野 輝夫^{†1,†3}

環境のモニタリングを目的とするセンサネットワークでは、各センサが収集した情報を特定のシンクノードまで送り届ける必要がある。その際に、監視対象の事象によっては局所的に時間当たり発生するデータ量が変動する場合があり、パケットロスや輻輳の影響で、得られたすべてのデータを転送しきれずにその一部が失われてしまう可能性がある。本稿では、このような環境下において、各ノードに備えられたバッファの空き容量の推移を見積もり、利用効率改善を試みることで失われるデータ量を最小化できるような情報収集プロトコルを提案する。

A Data Gathering Protocol to Minimize Data Losses Based on Prediction of Capacity of Neighbor Sensor Nodes

AKIHIRO INAGAKI,^{†1} SHUNSUKE MORI,^{†1,†2}
TAKAAKI UMEDU,^{†1,†3} HIROZUMI YAMAGUCHI,^{†1,†3}
and TERUO HIGASHINO^{†1,†3}

In a wireless sensor network that observes environment, the sensor nodes must transfer gathered information to the given sink node. In some applications, the amount of gathered information may fluctuate locally and temporally. Some of data may be lost as a result of packet collisions and network congestion caused by such fluctuation. In this paper, we will propose a new information gathering protocol to solve such problems. In our protocol, each node manages flows of data to minimize data losses by predicting the progress of their buffering capacity.

1. はじめに

モニタリングなどのワイヤレスセンサネットワーク (WSN) アプリケーションにおいて多くの場合はセンシングしたデータをシンクまで送り届ける必要がある。特に時間やノードの位置によってセンシングする対象が異なったり、データの量に偏りがあったりする場合、突発的かつ局所的にデータが大量発生する事態が発生しうる。例えば、モニタリングにおいて平常時に発生するデータ量はそれほど多くなくても、監視したいイベントが発生した時にイベントを検知したノードで発生するデータ量が大幅に増加することがある。例えば火災のモニタリングを行う際に、火災を検知した時には通常時の温度だけでなく、より多く詳細な情報を集める場合がこれに該当する。文献 1) のように映像を扱う場合はデータサイズが大きくなるため、発生するデータ量も大きくなる。そのような場合、ノード端末のバッファ容量や通信帯域の不足のためセンシングしたデータを廃棄せざるを得ない状況に陥る恐れがある。アプリケーションによってはデータの損失が発生すると動作に支障をきたしたり、精度が低下するものもあるため、データ廃棄の量は最小に止めなければならない。仮に各ノードがシンクまでのルーティングパスを知っており、シンプルにシンク方向への送信を繰り返すことでシンクへデータを届けていると仮定すると、局所的にデータが大量発生した場合に、一部のノードでデータの混雑が発生することになり、データ損失が発生する可能性が高い。しかし、ネットワーク全体を見ると他にバッファの残量に余裕のあるノードが存在する可能性は高いため、本稿ではそういったノードを活用してデータを分散させることでデータ損失を減らすことの出来る WSN 用データ収集プロトコルを提案する。

より具体的には、各ノードは自ノードのバッファの空き容量や、自ノードでのセンシングで発生するデータ量や、隣接ノードとの間の通信量などから、自身のデータ受け入れ余地を計算し、周囲のノードへ知らせる。周囲のノードは、受け入れ余地が大きくシンクに近いノードへとデータを転送する。制御メッセージ量の削減のため、受け入れ余地の通知は 1 ホップ隣のノードとの間でのみ行う。隣接ノードの受け入れ余地が大きい場合には、自ノードからそちらのノードへとデータを移動させることで、自ノードの受け入れ余地を回復しや

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{†2} 日本学術振興会特別研究員 DC
Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

^{†3} 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
Japan Science Technology and Agency, CREST

すいため、このような局所的なアルゴリズムでもそれなりに広い範囲での改善効果が期待できると考えられる。以上のようなプロトコルを設計し、簡単なシミュレーション実験によりその効果を確かめた。シミュレーション実験は、我々の研究グループで提案している WSN アプリケーションの実装・デバッグ・評価コストの削減を目的とした開発環境 D-Sense^{2),3)} を用いて行った。

2. 関連研究

WSN において、ネットワーク内の各々のセンサノードが得たデータを特定のシンクまで届ける処理は様々なアプリケーションにおいて必要となる。特に、シンクまでデータを届ける途中のノードにデータが集中しすぎるために、データの廃棄の発生、スループットの低下によるデータの転送効率の悪化、といった問題が起きる可能性があり、これらの問題に対処するための様々なプロトコルが開発されている。例えば、文献 4) で、様々なシンプルなデータ混雑の回避手法の性能評価を行っている。

本稿において提案するプロトコルは、データの廃棄を最小とすることを目標としているが、これとは目的の異なるデータ混雑回避プロトコルも数多く設計されている⁵⁾⁻¹²⁾。例えば、データやノードの種類に応じて優先度を付け、優先度の高いデータから確実にシンクに届けることでデータの混雑に対応する手法が考案されている⁵⁾⁻⁷⁾。このような手法は、収集するデータ量よりも収集するデータの価値の大きさを重視するアプリケーションにおいて有効である。文献 8) も同様に、アプリケーションにとってより重要な情報ほどより確実にシンクに届けることを目的とし、センサが監視する範囲内でのターゲットトラッキングを対象とし、複数ノードがあるノードに対してパケットを送信したいという状況をオークションに見立てた手法を提案している。ここではデータが集中して混雑している送信先ノードを競売人、パケットを送信するノードを入札者と考え、アプリケーションにとってのその情報の重要度を入札して、勝ったノードが送信権を得る仕組みで負荷の分散を実現している。文献 9) では、データの混雑を回避し、シンクへのパケット到達の公平性を保証するトランスポート層で動作するアルゴリズムを提案している。ここでの公平性とは、シンクまでの距離に関係なく、シンクに届けられるパケットの数が等しいことを示す。IFRC¹⁰⁾ では、データ送信の公平性と共に効率性を重視している。バッファサイズを見て混雑を初期段階で検知し、低オーバーヘッドで混雑状態を共有するメカニズムを使用して、干渉の可能性のあるノードに対して混雑状態を周知する。これらの周知された情報を踏まえて、公平かつ効率の良いデータ送信を可能とする送信レートを決定する。文献 11) で提案されている手法は、

マルチホップによりデータを届ける際の送信遅延を最小にすることを目的とし、データの混雑の原因となっているリンクを通らないようにトラフィックの向きを変えることで混雑の軽減を図っている。DPCC¹²⁾ は、チャンネルの質を見積もり、キューの使用率を見ることでデータの混雑の始まりを検出する。混雑を検知したらエネルギー効率を考慮し、適切な送信レート、及び送信時のバックオフを決定する。これらの手法は、一部のデータを廃棄することはやむを得ないとの考えに基づいているため、本論文で提案している手法とは異なるアプローチを採っている。

本稿で提案している手法と同様にデータの損失量を少なくすることを目標としている手法としては Envirostore¹³⁾、Siphon¹⁴⁾ が挙げられる。Envirostore は、各ノードが自身のストレージ残量が一定以上になるなどの条件を満たしたらデータを移動させることでデータの混雑を回避する。シンクとは非連結であることを仮定しており、移動端末がネットワーク内に移動してきた時に溜めていたデータを受け渡すことで、シンクにデータを届ける。データの分散を行う際にデータの最終的な目的地を考慮していない点が本稿で提案している手法とは異なっている。Siphon では、仮想シンクとなるノードをいくつか選び、高負荷の兆候が見られるセンサ領域からそこにデータを移してきて、最終的に本物のシンクまでデータを運ぶことでデータの損失量を軽減している。ただし、この手法では仮想シンク以外のノードのバッファの利用は行わないのに対し、本稿で提案している手法では、全てのノードのバッファを仮想的にネットワークのバッファとみなし、より多くのデータをネットワーク上のノードのバッファ内に溜め込むことを可能とすることで、さらにデータの損失量の軽減を試みている。

本稿で提案している手法は自律分散型手法であるが、シンクを中心とした集中制御によってデータの損失を軽減する手法も提案されている。CODA¹⁵⁾ は、データの受信ノードのバッファ状態を見て混雑検知を行い、その情報は一定周期でソースノード方向へ送っているメッセージに載せて通知する。これを利用して、混雑状況に応じてシンクが複数のソースノードに対して、送信レートを決定して指示する。RCRT¹⁶⁾ では、シンクがネットワーク全体の振る舞いを考慮して、効率の良い混雑検知と各ノードのレート割り当てを行うことでセンシングデータの損失量を軽減している。CRRT¹⁷⁾ では、MAC 層の効率の良い再送制御により 1 ホップの送信の信頼性を高め、さらにエンド・ツー・エンドの送信においても再送制御を行いデータの損失を防止する。シンクへの送信レートはシンクが各ノードに対して割り当てる。以上の手法に対し、自律分散型を採用している本論文で提案している手法ではより制御パケットの数を少なくすることができるため、エネルギーの損失も軽減すること

ができる．

3. 提案プロトコルが対象とする情報収集問題の定義

3.1 想定するセンサネットワーク環境

本稿では，WSN において，データ収集を行う際に各ノードのバッファ容量と通信容量の不足やパケット衝突によって発生するデータ損失を，バッファ残量に空きがあるノードを活用することで最小とし，やむを得ず損失したデータを除く全てのデータをシンクへ届ける自律分散型ルーティングを行うプロトコルを提案する．提案プロトコルではデータがシンクに到達するまでの遅延については考えず，データの損失を可能な限り減少させることを目標とする．

本手法では，WSN においてセンシングデータをマルチホップによって 1 つのシンクまで運ぶ必要のあるアプリケーションを想定している．前提として，WSN 上の各センサノードやシンクはメッシュ状に配置されて静止しており，ノード間リンクは一時的なパケット衝突やノイズによるパケットの受信失敗の可能性はあるが，長期的なリンクの切断などはなく基本的に安定しているものとする．また，ネットワークトポロジが持つ特徴として，連結であること，ある程度センサノードが密集していること，シンクまでのパスを複数持つノードが多数存在することを仮定している．各ノードは，それぞれの周囲をセンシングしており，無線マルチホップ通信を介してデータをシンクへと送信する．収集されるデータは平常時には比較的少ない量で安定しているが，特殊な事象が検知された場合には増大するような用途での利用を主に想定する．また，各ノードにはデータを蓄えるための小規模なバッファが備えられており，ネットワークの混雑などでデータをシンクへと遅れない場合には，ある程度の量のデータをバッファリングすることが出来るものとする．データのセンシングや他ノードからのデータの受信が行われることでバッファ残量は減少する．データの送信に関しては，データの損失を抑えるため，考受信者が ack を返しその ack を送信側が受け取った時点で送信成功と見なすものとする．その際，転送にデータは削除可能となるのでバッファ残量は増加する．一定時間 ack が帰ってこない場合には可能な限りデータの再送信を行う．

提案プロトコルでは，センサネットワークの各ノードが自身の一定時間後のバッファの残量を予測し，シンクまでの距離とあわせて周辺のノードへと通知する．通知されたノードは，周辺のノードの状況を比較し，その結果を踏まえて各隣接ノードに対するデータ送信レートの決定を行う．これにより，よりバッファ残量の大きいノードを活用したデータの分散を行いつつシンクへのデータ送信を実行しており，データ損失を最小にするという目標の

達成を目指す．また，通信に要するエネルギーを抑えることを考え，センサネットワークの各々のノードが計算を行う自律分散型的手法としている．特に，各ノードが近隣ノードの情報のみを用いて計算を行うことで，制御パケット数を少なくして使用エネルギーの抑制を図っている．

以下，この予測問題を定式化する．表 1 に定式化で用いる記号の一覧を示す．

3.2 バッファ残量予測問題の入力

各ノードは長さが可変のタイムスロットごとに，各近隣ノードとの間でどの程度の速度でデータをやりとりするかを計算しなおす．送受信レートは，直前スロットの統計情報から計算する．ノード i の隣接ノード数を k ，隣接ノードの ID を n_1, n_2, \dots, n_k として，計算の入力として自身のバッファ残量 B_i ，現在のセンシングレート S_i ，各隣接ノードに対する送信レート $T_i(n_1), T_i(n_2), \dots, T_i(n_k)$ ，自身の最大通信容量 T_i ，タイムスロット内で再送したデータ量 $ReSend$ ，シンクまでのホップ数 H_i を用いる．なお， $T_i(n_j)$ の値が正の場合には，隣接ノード n_j に対してデータを送信しており，負の場合には n_j からデータの受信を行っていることを意味する．まず，隣接ノードに対する送信レート $T_i(n_1), T_i(n_2), \dots, T_i(n_k)$ の絶対値の総和は i の通信容量以内である必要がある．

$$\sum_{j=1}^k |T_i(n_j)| \leq T_i \quad (1)$$

ただし，実際はパケット衝突によるパケット損失が発生する．本研究では，データの損失を最小にすることを目的としているので，パケット損失が検出された場合には再送制御を行い，確実にパケットを届けるよう努力する．再送を行えば実質的に送信レートが低下し，バッファ残量の回復が抑制されるので再送されるデータ量についても考慮する必要がある．したがって，直前のスロットで自らが再送を行ったデータの量を単位時間当たりの再送データ量 $ReSend$ として記憶しておく．また，タイムスロットの長さ $span$ は，センシングレートの変動に合わせて，各スロットの開始時に再計算する．例えば，ピークレート時はデータ量が一気に増えバッファ容量が不足することが考えられるため，送信レートの制御が頻繁に必要な状況が起こりやすいと思われる．したがって，そのような場合には $span$ は短く設定され，センシングレートが低い状態になれば $span$ は長く設定される．

3.3 バッファ残量予測問題の出力

次のスロットで用いる各隣接ノードに対する送信レート $T_i^{new}(n_1), T_i^{new}(n_2), \dots, T_i^{new}(n_k)$ を出力する．

表 1 記号一覧

記号	定義
B_i	ノード i の現在のバッファ残量
ΔB_i	一定期間のバッファ残量の予測変化量
S_i	ノード i の現在のセンシングレート
$T_i(n)$	ノード i からノード n への現在のデータ送信レート (値が負であれば n から i へデータ送信が行われているものとする)
$T_i^{new}(n)$	新たに算出したノード i からノード n へのデータ送信レート
T_i	ノード i の最大通信容量
$ReSend$	単位時間あたりの再送データ量
H_i	ノード i からシンクまでの最短ホップ数
$span$	決定した送信レートを継続する期間 (秒)
$BSTH_i$	ノード i が $B_i, S_i, T_i(n), H_i$ から算出するバッファの受け入れ余地
$\Delta BSTH_i(n)$	ノード i が $BSTH_i$ と $BSTH_n$ を比較した結果の値

4. 提案する情報収集プロトコル

4.1 プロトコルの設計方針

ネットワークを構成する各ノードは、各タイムスロットが始まるタイミングで $B_i, S_i, T_i(n), ReSend, H_i, span$ から、自ノードのデータ受け入れ余地 $BSTH_i$ を算出する。計算された $BSTH_i$ は隣接ノードに周知される。 $BSTH_i$ の計算と周知を行った後、各隣接ノード n_j から受信した最新の $BSTH_{n_j}$ と $BSTH_i$ を比較して、その隣接ノードに対してどの程度のレートでデータを送信するか、あるいは受け入れるかを決定する。データを受け入れる場合は送信要求をその隣接ノードに対して送り、指定レートでの送信を実行させる。

4.2 各ノードのデータ受け入れ余地 $BSTH_i$ の算出

各ノードは自身のバッファの受け入れ余地 $BSTH_i$ を計算し、周囲のノードに知らせる。ここで $BSTH_i$ は、値が大きい場合には、バッファ・帯域・センシング状態から自身のバッファに余裕があり多くのデータを受信可能であるよう定める。周囲のノードはそれらの値から周辺の各ノードへの送信レートを調整する。まず、ノードは現在のセンシングレート S_i 、隣接ノードに対する送信レート $T_i(n)$ 、単位時間あたりの再送データ量 $ReSend$ から、次のスロットでのバッファ残量の変化量を予測する。

$$\Delta B_i = span \left(\sum_{j=1}^k T_i(n_j) - S_i - ReSend \right) \quad (2)$$

B_i が正であれば次のスロットで i のバッファ残量は $|\Delta B_i|$ 分増加し、負であれば $|\Delta B_i|$ 分

バッファ残量が減少するという予測をしていることになる。式 (2) で求めたバッファ残量の変化量 ΔB_i 、現在のバッファ残量 B_i 、シンクまでのホップ数 H_i から、 $BSTH_i$ を計算する。

$$BSTH_i = \alpha \Delta B_i + \beta (B_i + \Delta B_i) + \gamma \frac{1}{H_i} \quad (3)$$

ここで、 α, β, γ はパラメータであり、これらのパラメータの値を調節することにより式中の 3 つの項の重み付けを行う。第 1 項 (係数 α) では次のスロットでの i のバッファ残量の変化量の予測を考慮している。この項の値が大きいほどバッファ残量の増加度合いが大きい、すなわちバッファの空き容量が増えるのでデータを送信してもよいと予測することになる。第 2 項 (係数 β) では $span$ 秒後の i のバッファ残量の予測値を考慮している。この項の値が大きいほど実際のバッファの空き容量が大きいのでデータを送信してもよいと予測することになる。第 3 項 (係数 γ) では i からシンクまでのホップ数を考慮している。可能な限りシンクまでのホップ数が少ない方へデータを送信したいので、そのような場合にこの項の値が大きくなるように定めている。このように定義することで、バッファ残量が急速に減少しておらず、残量値自体も大きく、よりシンクまで近づくようなノードへデータが送られるため、データの分散による損失防止とデータのシンクへの伝達を可能にしている。上記の計算を各々のノードが新たなスロットの始まりに行い、それを隣接ノードへ周知する。また、スロットの途中でバッファの残量がなくなった時には、その時点でタイムスロットを終了として、 $BSTH_i$ の計算と周知を行うことで、データが送信されているノードに対しては送信を停止させる。

4.3 データ送信レートの決定

ネットワークを構成する各ノード i は、隣接ノード n_j について受信した $BSTH_{n_j}$ と $BSTH_i$ を比較して、式 (1) の制約を満たすように n_j に対するデータ送信レート $T_i(n_j)$ の決定を行う。これらの処理は $BSTH_i$ の計算と周知を行った直後に、全ての隣接ノードに関して行う。まず、 $BSTH_i$ の値が大きいノードへデータを送信するので、 $BSTH_i$ と隣接ノード n_j の $BSTH_{n_j}$ を比較する。

$$\Delta BSTH_i(n_j) = BSTH_n - BSTH_i \quad (4)$$

$\Delta BSTH_i(n_j)$ の値が正であれば i から n_j へ、負であれば n_j から i へデータを送信することになる。続いて、 $|\Delta BSTH_{n_j}|$ に従って通信容量を比例配分することで、各 n_j との間のデータ送信レートを決定する。

$$T_i^{new}(n_j) = T_i \frac{\Delta BSTH_i(n_j)}{\sum_{j=1}^k |\Delta BSTH_i(n_j)|} \quad (5)$$

$T_i^{new}(n_j)$ が決まれば n_j に対しての送信レートを $T_i^{new}(n_j)$ に変更してデータの送信を行う。 $T_i^{new}(n_j)$ が負になった場合、すなわち n_j から i へデータを送信する場合は n_j に対してデータ送信要求を送り、 $|T_i^{new}(n_j)|$ の値を指定データ送信レートとして通知する。 n_j がこの要求を受け取ったら指定データ送信レートで i への送信を開始する。ただし、自身のバッファ残量がなくなっている場合は $T_i^{new}(n_j)$ が負であってもデータ送信要求は送らず、データの受信も行わない。

4.4 再送制御

$BSTH_i$ の通知のような制御メッセージを除くデータの送受信については、データを受信したノードは送信ノードに対し ack を返送する。送信ノード側で一定時間受信ノードからの ack が検出されない場合はデータの再送を行い、ack が検出されれば送信したデータをバッファから削除してバッファ残量を増やす。

5. シミュレーション実験による性能評価

本手法について、無線ネットワークシミュレータ QualNet¹⁸⁾ を用いたシミュレーションにより評価を行った。本手法はデータの損失を可能な限り減少させることを目標としているので、本手法を実行した際のデータロス率(ネットワーク内の全てのノードが損失したデータ量/全てのノードにおいて発生したデータ量)を評価している。本手法(以下(1)と表記)によってデータロス率が改善されることを示すために、生成したデータをシンクに近づくノードへ送信することを繰り返すシンプルなデータ収集手法(以下(2)と表記)との比較を行った。シミュレーション実行時に設定が必要なパラメータの値を表2に示す。spanについては今回のシミュレーションでは一定の値とした。ノードは図1に示すように配置し、いずれのノードも移動は行わないものとする。また、図1の左下に位置しているノード1をシンクとした。ターゲットトラッキングを想定し、ターゲットが図1の左から右へ30秒かけて移動し、これを60秒に1回繰り返すものとし、それに合わせて各ノードでデータを発生させた。通常時は毎秒1つのデータが発生し、ターゲットがそのノードから250m以内に接近してきた場合に毎秒5つのデータが発生し、これが10秒間続くものとした。以上の条件設定下で3回シミュレーションを実行した。上記の条件で実行したシミュレーションにより得た平均データロス率を表3に示す。(2)の平均データロス率より表2に示す条件設定においては何も工夫をしない場合は30パーセントのデータの損失が発生することがわか

表2 シミュレーション実行時のパラメータの値

シミュレーション時間	600 秒間
ノード数	30 ノード
フィールドサイズ	1500m × 1500m
バッファサイズ	512kB
データサイズ	1000B
最大スループット	250kbps
通信範囲	300m
α	1
β	1
γ	10000
span	2 秒

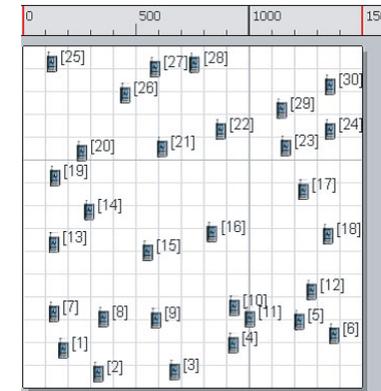


図1 シミュレーション実行時のノード配置

る。一方、(1)のデータの損失は15パーセント程度であり、(2)と比べて充分平均データロス率が減少していることがわかる。したがって、アプリケーションが想定通りの動作が可能であり、アプリケーションの開発を適切に行うことができたことが分かる。これより、本論文で提案したAPIが新規アプリケーションの開発において有用であることが示された。

6. まとめと今後の課題

本稿では、センシングしたデータを特定のシンクまで送り届ける必要がある状況を考え、バッファ残量に空きがあるノードを活用することでデータの損失を削減する自律分散型ルー

表 3 シミュレーションにより得た平均データロス率

実験回数	(1)	(2)
1	14.174%	28.344%
2	16.426%	35.421%
3	13.074%	30.832%
平均データロス率	14.558%	31.532%

ティングを行うプロトコルを設計し, シミュレーション実験により評価し, 単純なデータ収集方法に対してデータロスを半分程度に押さえられることを確認した. 今後はより複雑な既存手法との比較や, 実装実験を行ってきたい.

参 考 文 献

- 1) A.Newell and K.Akkaya: *Distributed collaborative camera actuation for redundant data elimination in wireless multimedia sensor networks*, Ad Hoc Networks, Vol. 9, No. 4, pp. 514.527 (2011).
- 2) 森駿介, 梅津高朗, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫: ワイヤレスセンサネットワークの設計開発支援環境 *D-sense*, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 10, pp. 2556.2567 (2009).
- 3) 森駿介, 稲垣彰祐, 梅津高朗, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫: 分散協調型無線センサノード群の実行コード自動生成, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 110, No. 40, pp. 197.204 (2010).
- 4) B.Hull, K.Jamieson and H.Balakrishnan: *Mitigating Congestion in Wireless Sensor Networks*, Proc. of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems(SenSys 2004) (2004).
- 5) J.Lee and I.Jung: *Adaptive-Compression Based Congestion Control Technique for Wireless Sensor Networks*, Sensors 2010, Vol. 10, No. 4, pp. 2919.2945 (2010).
- 6) C.Wang, B.Li, K.Sohraby, M.Daneshmand and Y.Hu: *Upstream Congestion Control in Wireless Sensor Networks Through Cross-Layer Optimization*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 25, No. 4, pp. 786.795 (2007).
- 7) M.H.Yaghmaee and D.Adjeroh: *A New Priority Based Congestion Control Protocol for Wireless Multimedia Sensor Networks*, Proc. of the 2008 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks(WOWMOM 2008) (2008).
- 8) C.Wan, S.B.Eisenman and A.T.Campbell: *Auction-Based Congestion Management for Target Tracking in Wireless Sensor Networks*, Proc. of the IEEE International Conference on 48 Pervasive Computing and Communications(PerCom 2009), pp. 1.10 (2009).
- 9) C.T.Ee and R.Bajcsy: *Congestion Control and Fairness for Many-to-One Rout-*

- ing in Sensor Networks*, Proc. of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems(SenSys 2004) (2004).
- 10) S.Rangwala, R.Gummadi, R.Govindan and K.Psounis: *Interference-Aware Fair Rate Control in Wireless Sensor Networks*, Proc. of the 2006 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications(SIGCOMM 2006) (2006).
- 11) A.Basu, B.Boshes, S.Mukherjee and S.Ramanathan: *Network Deformation: Traffic-Aware Algorithms for Dynamically Reducing End-to-end Delay in Multi-hop Wireless Networks*, Proc. of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking(MobiCom 2004) (2004).
- 12) M.Zawodniok and S.Jagannathan: *Predictive Congestion Control Protocol for Wireless Sensor Networks*, IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol. 6, No. 11, pp. 3955.3963 (2007).
- 13) L.Luo, C.Huang, T.Abdelzaher and J.Stankovic: *EnviroStore: A Cooperative Storage System for Disconnected Operation in Sensor Networks*, Proc. of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications(INFOCOM 2007), pp. 1802.1810 (2007).
- 14) C.Wan, S.B.Eisenman, A.T.Campbell and J.Crowcroft: *Siphon: Overload Traffic Management Using Multi-Radio Virtual Sinks in Sensor Networks*, Proc. of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems(SenSys 2005) (2005).
- 15) C.Wan, S.B.Eisenman and A.T.Campbell: *CODA: congestion detection and avoidance in sensor networks*, Proc. of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems(SenSys 2003) (2003).
- 16) J.Paek and R.Govindan: *RCRT: Rate-Controlled Reliable Transport for Wireless Sensor Networks*, Proc. of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems(SenSys 2007) (2007).
- 17) M.M.Alam and C.S.Hong: *CRRT: Congestion-Aware and Rate-Controlled Reliable Transport 49 in Wireless Sensor Networks*, IEICE Trans. on Communications, Vol. E92.B, No. 1, pp. 184. 199 (2009).
- 18) Scalable Network Technologies, Inc.: *QualNet Simulator*. <http://www.scalable-networks.com/>.