

センサネットワークにおける高いネットワークコーディング機会 を実現するルーティング方式の提案

白石朋広^{†1} 安達直世^{†2} 滝沢泰久^{†2}

データセントリックなセンサネットワークではメッシュネットワークが構成され、このようなネットワークにネットワークコーディング(以降, NC)を適用することによりスループットの向上と省電力化が図れる。しかし, センサネットワークにおいて標準ルーティング方式である AODV は必ずしも NC に適したルートを構成するとは限らない。本報告では AODV をベースとして高い NC 機会を実現するルーティング方式を提案する。

Proposal of Routing for Increment in NC Opportunity on Wireless Sensor Networks

TOMOHIRO SHIRAIISHI^{†1} NAOTOSHI ADACHI^{†2}
YASUHISA TAKIZAWA^{†2}

A data-centric sensor networks construct a mesh network. On such networks, network coding (NC) can increase in throughput and can reduce power consumption. On the other hand, AODV that is a standard routing on sensor networks has the possibility that its route is not suitable for NC. In this report, routing which increases in NC opportunity based on AODV is proposed.

1. はじめに

近年では、The Internet of Things、The Cloud of Things といったモノとモノがネットにつながるユビキタスネットワークが注目されている。ユビキタスネットワークを実現するための技術として、無線センサネットワークが活発に研究されている。この無線センサネットワークは、各種センサを搭載した無線センサノードにより構成され、これを利用したサービスとして、環境モニタリングや気象観測、災害対策等が考えられている¹⁾。このようなサービスを提供できる背景として、センサノードの小型化や低コスト化が挙げられる。無線センサネットワークに用いられるセンサノードは、センシング期間が 5~6 年程度の長期にわたるが、その間センサノードに充電を行うのは非常に困難である。そのためセンサノードの電力消費を抑えることが重要である²⁾。

現在、省電力技術は 2 つに大別できる。1 つは各ノード間の送信回数の削減により消費電力を削減する方式、もう 1 つはノードをスリープ状態にして消費電力を削減する方式である。各ノード間の送信回数の削減により消費電力を削減する方式は、データの送信量の削減により省電力効果を期待することはできるが、同時にデータ量が減少するためアプリケーションレベルでのスループットが低下し、それに伴いデータの精度も低下する。

一方、ノードをスリープ状態にして消費電力を削減する方式は、使っていないノードをスリープ状態にすることでそれぞれのノードに対して省電力効果を期待できるが、スリープ状態のノードの箇所のデータが採取できず、前者と同様にアプリケーションレベルでのスループット及びデータの精度が低下する。

上記問題を解決するため、アプリケーションレベルでのスループットを維持しつつ、消費電力の削減を行うため、本稿では無線センサネットワークにネットワークコーディング(以降, NC)を適用する。NC は、複数のパケットを中継ノードで符号化しブロードキャストで送信する。符号化されたパケットを受け取ったノードはそれを復号し目的のパケットを得るという技術である。

しかし、無線センサネットワークにおける標準的なルーティングプロトコルである AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector、アドホックオンデマンド距離ベクトル)プロトコル³⁾が作成する経路では、NC に適さない経路を構成する場合がある。そこで本稿ではデータセントリックの無線ネットワークを前提として NC の機会を向上させるルーティング方式を提案する。

以下、2 章では、省電力方式の関連研究について述べる。3 章では、提案方式のルーティングプロトコルについて述べる。4 章では、今後の方針について述べる。

2. 関連研究

本章では、ネットワークにおける様々な省電力技術を、各ノード間の送信回数の削減により消費電力を削減する方式、ノードをスリープ状態にして消費電力を削減する方式に分類して説明する。

^{†1} 関西大学大学院 理工学研究科
Graduate School of Engineering, Kansai University.

^{†2} 関西大学 環境都市工学部
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University.

2.1 各ノード間の送信回数の削減により消費電力を削減する方式

各ノード間の送信回数の削減により消費電力を削減する方式の代表される技術として、SPAN⁴⁾がある。SPANは、ネットワーク内の全ノードに対して接続性を提供できる最小限のコアノード（コーディネータ）を活動状態にして、その他のノードを休止状態にしておくことで電力消費を抑えて、ネットワークの接続時間を向上させる手法である。全てのノードは必ず1台以上のコーディネータと通信可能な状態となっている。図1にSPANのネットワーク構成とコーディネータの関係を示す。

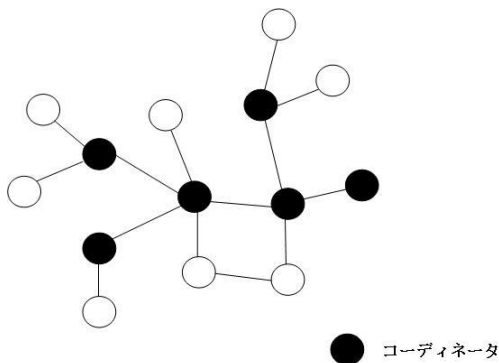


図1 SPANのネットワーク構成とコーディネータの関係

コーディネータになるか否かの判断は、電力残量や近隣ノード同士の接続性などの情報を用いて判断する。電力残量の多いノードや近隣ノードが多く存在するノードほど、コーディネータ通知メッセージを送信するまでの遅延時間が短くなり、コーディネータになり易くなる。もし自身がメッセージを送信する前に他のノードからコーディネータ通知メッセージを受信した場合は、再度自身がコーディネータになるか否かを判断する。

この手法においても、稼働するノードの数が減少することから、アプリケーションスループットが低下すると考えられ、データ精度が維持できないという問題点がある。

2.2 ノードをスリープ状態にして消費電力を削減する方式

ノードをスリープ状態にして消費電力を削減する方式の代表される技術として、CCP(Coverage Configuration Protocol)⁶⁾がある。CCPは、全てのセンシング対象がアクティブなセンサノードのセンシング領域に入っている場合、不要なノードをスリープさせることによりセンサネットワークの寿命の最大化を図る。CCPの動作イメージを図2に示す。図2のように、全てのスリープノードはアクティブノードの通信範囲に入っており、アクティブノードの通信範囲はセンシング領域全てをカバーすることができる。

この方式を使用する前提条件として、センサノードが冗

長に配置されていることと、センシング領域がわかっていることが挙げられる。センサノードの位置、センシング領域の形や広さ、センシング領域の重なり具合などを知ることによって、効果を高めることができる。CCPでは不要なセンサノードがアクティブになること、必要なセンサノードがスリープすることを避けるための中間状態を設定し、センシング領域のカバー度合いで、通信範囲を判定する。

しかし、CCPではアプリケーションスループットが低下する問題があり、精度を維持することができない。

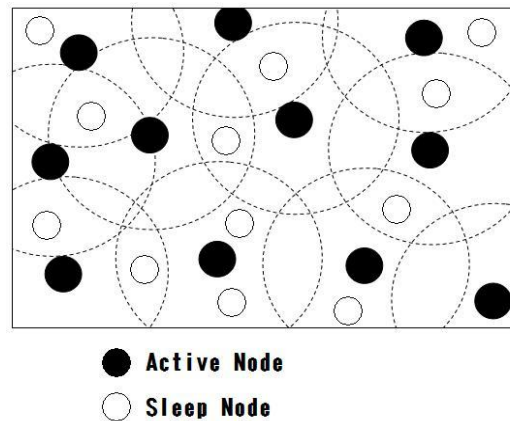


図2 CCPのActiveNodeとSleepNode

3. 提案方式

本章では、はじめにNCの概要について記述する。次に提案方式のベースとして使用したAODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector、アドホックオンデマンド距離ベクトル)プロトコルの概要とアルゴリズムについて説明する。その後、提案方式についての説明を行う。

3.1 NC方式

NCの動作を以下の図3を用いて説明する。

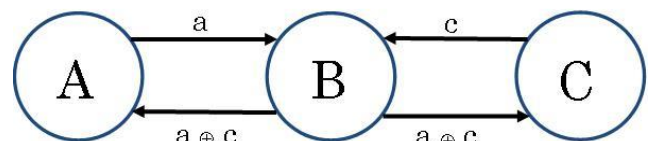


図3 ネットワークコーディングの動作

図3は、ノードA、ノードCがノードBを介して双方向通信を行っている。ノードA及びノードCが送信したパケット(aおよびc)は、まずノードBへ届けられる。次に、中継ノードであるノードBにおいて、パケットa,cに対して、符号化パケット $a \oplus c$ を作成する。符号化パケット $a \oplus c$ を受け取ったノードAでは、受信した符号化パケット $a \oplus c$ とノードAが送信したパケットaから、所望のパケットcを復号することができる。ノードCでも同様にして所望のパケットaを復号することができる。

従来の2ホップユニキャスト通信では、全体で4回の送信を行わなければならなかったが、NCにより同一のデー

タ量としつつも、3回に削減することができる。従って、データ量を維持しつつ、送信回数削減により省電力化が出来る。また、送信パケット数を削減することで、パケット同士の衝突が減り、パケットロスによるスループットの低下を防ぐことが出来る。この点においても、データ精度の維持も可能だと考えられる。NCはこのような単純なトポロジでは効果は薄い、メッシュ型トポロジに適用することにより非常に大きな効果が期待できる。削減できるパケット送信数の期待値を以下の式に示す。以下の式ではそれぞれ、両端ノードからそれぞれ1つパケットを送信している。

$$Xmit_{NC} = \sum_i^{hop-1} i + (hop + 1) \times n \quad (1)$$

$$Xmit_{unicast} = \sum_i^{hop-1} i + 2hop \times n \quad (2)$$

$$R = \frac{Xmit_{NC}}{Xmit_{unicast}} = \frac{\sum_i^{hop-1} i + (hop + 1) \times n}{\sum_i^{hop-1} i + 2hop \times n} \quad (3)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} R = \frac{hop + 1}{2hop} \quad (4)$$

式(1)はNCを適用した場合の全ノードのパケット送信回数の合計を表している。第1項は全ての中間ノードのユニキャスト転送回数である。第2項は中間ノードのNCパケットブロードキャスト送信回数と両端ノードからのユニキャスト送信回数であり、 n はノードの総数である。式(2)は従来通りのユニキャスト通信の場合の全ノードのパケット送信回数の合計を表している。第1項は式(1)と同じだが、第2項は各ノードが双方向通信を行うため両端ノードのパケット2つとホップ数と全ノード n の積となっている。式(1)、(2)から送信回数の比率を求める事が出来る。結果が式(3)である。式(3)から全ノード数を無限大にすると式(4)となりネットワーク全体で送信回数を約半分まで削減することができる。

このようにACK無の場合従来の約半分のパケット送信数で通信を終了することができる。このことから、本稿では、NCに焦点をあて、センサネットワークにおいてNC機会を増加させることにより、センサネットワークのライフタイムを延ばしつつ高スループットを実現できると考えた。

3.2 AODV プロトコル

AODV プロトコルはモバイルアドホックネットワーク(MANET)と他の無線アドホックネットワークのためのルーティングプロトコルの1つである。ノキアの研究所のC.Perkins とカリフォルニア大学サンタバーバラ校のE.Belding-Royer とシンシナティ大学のS.Das が共同開発した。ユニキャストおよびマルチキャストのルーティングが可能である。

3.2.1 動作手順

AODV プロトコルはオンデマンドで経路を探索する。すなわち、あるノードがデータパケットを送信しようとしたとき、経路確立要求が発生し、経路が確立される。AODVでは送信先シーケンス番号を使い、最近の経路を特定する。AODVでは送信元ノードや中間ノードはそのフローでの次のホップ(ノード)に関する情報だけを持っている。オンデマンド方式のルーティングプロトコルでは、送信元ノードが送信先への経路を知らない場合、RREQメッセージをネットワークにフラッディングする。AODVは、AODVが「送信先シーケンス番号」を使い、その送信先への最新の経路を識別する。受信したパケットの送信元シーケンス番号がノードの保持している送信元シーケンス番号より大きい場合のみ、そのノードは経路情報を更新する。RREQメッセージには「送信元識別子」、「送信先識別子」、「送信元シーケンス番号」、「送信先シーケンス番号」、「ブロードキャスト識別子」というフィールドがある。送信先シーケンス番号は送信元が受け入れた経路の新しさを示している。中間のノードがRREQメッセージを受け取ると、RREQメッセージ転送元ノードに対しての経路が無い場合は作成し次に転送するか、宛先ノードへの正しい経路を知っている場合はRREPメッセージを返す。中間のノードでの経路情報が正しいかどうかは、そのノードの持つ送信先シーケンス番号とRREQメッセージにある送信先シーケンス番号を比較することで判断する。同じRREQメッセージを複数回受け取ったことはフラッディングIDと送信元識別子の組で識別でき、二度目以降の場合は単に捨てる。正しい経路情報を持つ中間ノードでも送信先ノード自身でも、RREPメッセージを送信元に送ることができる。RREQメッセージを転送する中間ノードでは、転送元ノードのアドレスとフラッディングIDを保持しておく。そして対応するRREPメッセージが一定時間以内に返ってこない場合、その情報を消去する。

RREQメッセージが送信先ノードに届くと、送信先ノードはRREPメッセージを初期化する。RREPメッセージには、「送信先識別子」、「送信先シーケンス番号」、「送信元識別子」、「寿命」というフィールドがある。送信先識別子と送信元識別子には、RREQメッセージの送信元識別子と送信先識別子がコピーされる。送信先ノードは自分自身のシーケンス番号がRREQメッセージに書かれている送信先シーケンス番号よりも小さい場合に、自分自身のシーケンス番号を送信先シーケンス番号で書き換える。それから、その値をRREPメッセージの送信先シーケンス番号に書き込む。RREPメッセージを受け取った中間ノードは、RREPメッセージ転送(送信)ノードに対しての経路がない場合は経路を作成し、RREQメッセージ受信時に作成した経路を使いRREPメッセージを転送する。ある場合は、単にRREQメッセージ受信時に作成した経路を使いRREPメッセージを

転送する。このようにして RREP メッセージが送信先ノードに届く事で双方向の経路が作成され、データ通信が開始される。

3.3 データセントリックストレージ方式

この節ではデータセントリックストレージ方式について記述する。センサノードがストレージを持ち、センシングデータの保持を自律分散によりネットワーク全体で構造化して保持する。即ち、データセントリックストレージ方式は構造化 P2P であり、メッシュ型ネットワークを構成する。構造化には検索を高速化するための分散ハッシュテーブルが用いられている。以下の図 4 のように「orange」というデータを欲した場合、データ「orange」によりハッシュキーを作成し、このキーによりノードを特定する。従ってネットワークレイヤでの Query の送信にはフラッディングは不要でユニキャストにより行われる。この方式はデータに依存した柔軟な制御が可能であり、今後の重要技術として考えられる⁶⁾。

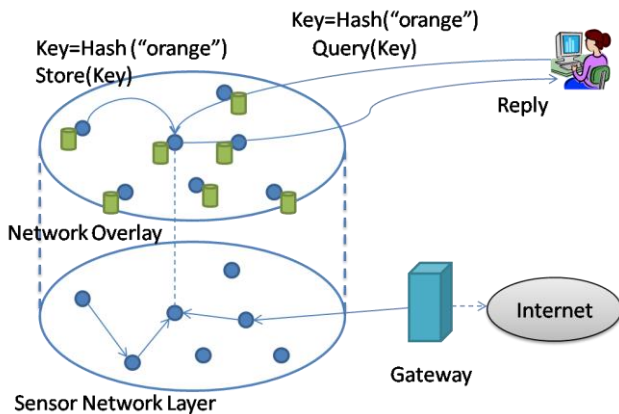


図 4 データセントリックストレージ方式

3.4 NC 機会を高めるルーティング方式

データセントリック型の無線センサネットワークは前節で説明したように構造化 P2P であるため、メッシュ型のトポロジを構成する。このトポロジにおいて、ルーティングプロトコルに AODV プロトコルを使用すると、各ノード間の通信において別々の経路を作成してしまう可能性があり、NC の適用には向かない。そのような場合を以下に示す。

- 2つのノード間で上りと下りの経路が対称に作成されない
 - 複数の対称経路が相互にパスを共有しない
- 後者の例を以下の図 5、図 6 を使って説明する。

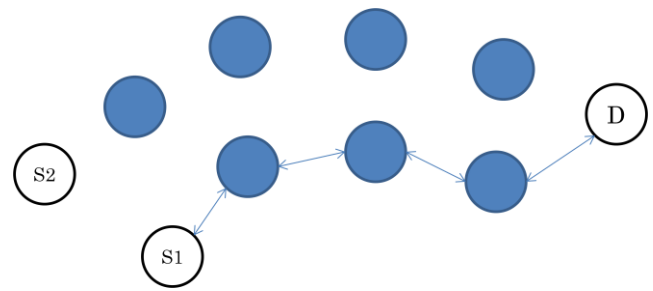


図 5 ノード S1 とノード D の通信

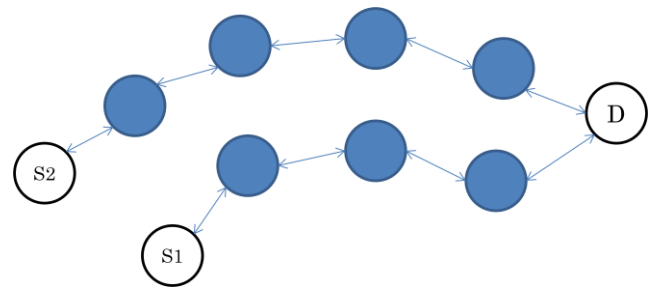


図 6 ノード S2 とノード D の通信①

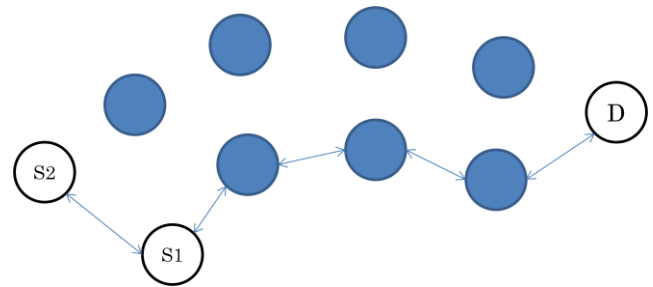


図 7 ノード S2 とノード D の通信②

図 5 はノード S1 がノード D との経路を既に作成している図である。この状態からノード S2 がノード D と通信するために経路作成を開始する。図 6 のようにノード S1 とノード D 間の経路とは別の経路を作成してしまうと、2つの経路のパスが共有されず、経路上でデータが交差する機会が減る。即ち、NC 機会が減ってしまう。しかし図 7 のようにノード S1 とノード D 間の経路と同じパスを共有してノード D との経路を作成するとノード S2,D 間のノードはノード S1,S2,D の中間ノードでそれぞれのデータが交差する機会が増え、NC 機会が増える。

このようにメッシュ型ネットワークにおいて高い NC 機会を実現するためには、複数の経路間でパスを共有し、データを集約して転送するようなルーティングを行う。そうすることにより、中間ノードでは NC の機会が増え、センサネットワーク全体の省電力化が見込める。このようなルーティングを行うために AODV に以下の改修を行った。

3.4.1 パス共有メトリック

パスを共有するメトリックとして「重み」というメトリックを使用する。この重みは、2 ホップ間でパスをいくつ共有しているかを調べるメトリックである。重みが 1 であ

ればパスは1つ共有しており、重みの値が大きければ大きいほどパスはより多く共有していると考えられる。この「重み」の算出方法を RREQ メッセージ、RREP メッセージと共に記述する。

タイプ	J	R	G	D	U	予約済み	ホップ数
RREQ ID							
送信先IPアドレス							
送信先シーケンス番号							
送信元IPアドレス							
送信元シーケンス番号							
該当ルーティングエントリ							
重み							

図 8 改修した RREQ メッセージヘッダ

タイプ	R	A	予約済み	Prefix	ホップ数
送信先IPアドレス					
送信先シーケンス番号					
送信元IPアドレス					
生存時間					
RREQ送信元ノード					
RREQ ID					

図 9 改修した RREP メッセージヘッダ

図 8 のように RREQ メッセージヘッダには該当ルーティングエントリと重みを追加した。該当ルーティングエントリは、自身のルーティングテーブルのエントリのラストホップに RREQ 転送元ノードがあれば、そのエントリを該当ルーティングエントリとし、RREQ メッセージヘッダに入れる。重みは、RREQ メッセージを受信したノードが該当ルーティングエントリのネクストホップに自身のアドレスがあるか調べる。あれば重みを 1 増やし、なければ値を変化させず RREQ メッセージをフラッディングする。

図 9 のように RREP メッセージヘッダには RREQ メッセージ送信元ノードと RREQ メッセージのフラッディング ID を追加した。この 2 つの項目により、どの RREQ メッ

セージに対しての RREP メッセージかを判断することが可能になり、これを 3.4.2 節の経路作成の際に使用する。そこで経路作成の中継ノードと宛先ノードの動作に以下の改修を行った。

3.4.2 経路作成の手順

従来の AODV プロトコルによるルーティングでは、RREQ メッセージ、RREP メッセージ転送元ノードへのエントリしか作成しない。しかしここでは後述の経路選択の指標となる「重み」を計測することができない。従って、提案方式ではルーティングテーブルのエントリの項目にラストホップを追加した。以下の図 10 を用いて説明する。

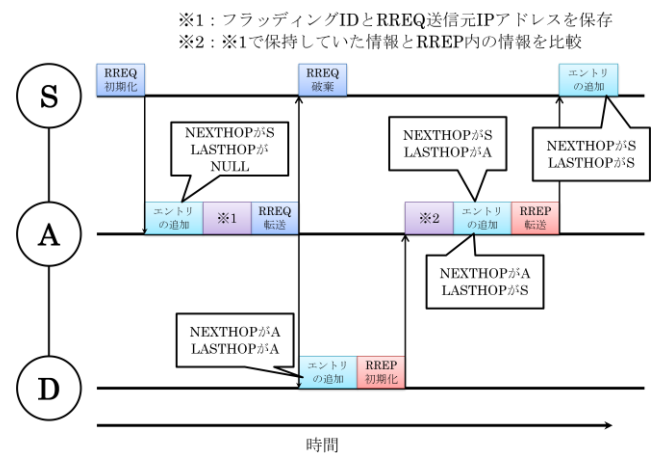


図 10 経路作成の動作

このラストホップの取得方法は、最初に、RREQ メッセージを受信したノード(仮にノード A とする)は、RREQ メッセージ転送元ノードをネクストホップに、ラストホップは NULL の状態のエントリを仮エントリ(エントリ①とする)として作成する。その際、RREQ メッセージ送信元ノードと RREQ メッセージのフラッディング ID を一定時間保持する。次に、ノード A が RREP メッセージを受信した時に、ノード A は RREP メッセージに含まれている RREQ 送信元ノードと RREP メッセージのフラッディング ID のペアをエントリ①作成時に保持していたペアと比較する。ペアが合致すれば、RREP メッセージ転送元をネクストホップ、ラストホップはエントリ①のネクストホップとしたエントリを作成する。そしてエントリ②のネクストホップをエントリ①のラストホップに置き換え、双方向のエントリとして確定させる。合致しなければ、エントリ①を破棄する。

3.4.3 中間ノードの動作

複数の経路間でパスを共有するために、経路選択の「重み」というメトリックを RREQ メッセージにて計測する。ホップカウントが 0 の時、つまり自身が RREQ メッセージ送信元ノードである時は従来通り RREQ メッセージをフラッディングする。次にホップカウントが 1 であった場合、RREQ メッセージを受信後、自身のルーティングテーブルのエントリのラストホップに RREQ メッセージ送信元ノ

ドが含まれているエントリ(該当ルーティングエントリ)を RREQ メッセージに書き込み、フラッディングを行う。最後にホップカウントが 2 以上であった場合、RREQ メッセージ内の該当ルーティングエントリを参照する。該当ルーティングエントリのネクストホップのノードが自身であると、自身の 2 つ前のノードまでは双方向の経路があると判断し、その数分「重み」を加算する。その後、自身のルーティングテーブルのエントリのラストホップに RREQ メッセージ送信元ノードが含まれているエントリ(該当ルーティングエントリ)を RREQ メッセージに書き込み、フラッディングを行う。

3.4.4 宛先ノードの動作

まず、宛先ノードは RREQ メッセージを受信すると、RREQ メッセージ内の該当ルーティングエントリのネクストホップが自身のノードであった場合、その数分重みを加算する。次に、最初の RREQ メッセージを受信してから中継ノードの RREQ メッセージ保持時間分待機し、別ノードからの RREQ メッセージの受信を待つ。そして、待機時間内に受信したすべての RREQ メッセージのホップ数、重みを比較する。評価レベルはホップ数>重みとし、ホップ数は最小、重みは最大の RREQ メッセージに対して、RREP メッセージを送信する。各ノードがこのような動作を行う事により、複数の経路間でパスが共有されていく。

3.4.5 パス共有化による問題点

一般的に無線センサネットワークではデータ量が少ない。従って、パスを共有することによるトラフィックの集中によるパケットロスの発生は少ないと考えられる。しかし、提案方式の、トラフィックを一部のパスに集中されると、一部のセンサノードに偏った電力消費となり、本来の目的を達成できない。この点に関しては、共有するパスを適時切り替えて、センサノードの電力消費を平準化する方式を検討する予定である。

4. おわりに

本稿では、データセントリック型のセンサネットワークにおいて、省電力を図るため NC を適用し、さらに NC 機会を増やすようなルーティング方式の提案を行った。今後は、提案方式をシミュレーションにてその有効性と問題点を評価・検証する予定である。

参考文献

- 1) 滝沢泰久:世界の情報処理を目指す無線センサネットワーク技術 Wireless Sensor Network Technology for Real World Computing, 関西大学理工学会誌 理工学と技術 vol.16, pp.59-64, 2009-12-01
- 2) 久保祐樹, 柳原健太郎, 野崎正典:無線センサネットワークの省電力化技術

- 3) C.Perkins,E.Belding-Royer, S.Das : Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, July 2003
- 4) 佐藤雄亮, 油田健太郎, 岡崎直宣, 富田重之, 朴美娘:データセントリックセンサネットワークにおけるルーティング方式, 情報処理学会研究報告.MBL, [モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告] vol.44, pp.125-130, 2007-05-17
- 5) B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, and R. Morris. Span : An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks, Kluwer Academic Publishers, Wireless Networks vol.8, pp.481-494, 2002
- 6) Xiaorui Wang, Guoliang Xing, Yuanfang Zhang*, Chenyang Lu, Robert Pless, Christopher Gill : Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks