

無線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

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し, さらにシミュレーションによる評価結果を示す。

Routing for Increment in NC Opportunity on Wireless Sensor Networks

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

A wireless sensor networks based on data-centric storage constitutes a mesh network. When network coding (NC) is applied to such wireless sensor networks, NC can increase in throughput and can reduce the number of transmissions. On the other hand, AODV, that is a standard routing on wireless 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. Furthermore its evaluation is described

1. はじめに

近年では, Internet of Things¹⁾、Cloud of Things といったモノとモノがネットにつながる Machine-to-Machine(M2M)通信が注目されている。M2M 通信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。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 から 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, センシング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, 同時にセンシング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, それに伴いセンシングデータの精度も

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センシング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)³⁾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⁴⁾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。そこで本稿ではセンシングデータ保存方式として今後重要となるデータセントリック⁵⁾を適用した無線センサ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, 実験結果及び考察について述べる。5 章では, まとめについて述べる。

^{†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. 関連研究

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、SPIN⁶⁾がある。SPIN では、データをブロードキャストする前にどのようなデータかという情報(メタデータ)を送信する。このメタデータを受け取った近傍ノードは、そのデータに興味がある場合のみデータ送信要求のメッセージを返信し、データを送信してもらう。図1にSPINのデータ転送処理を示す。

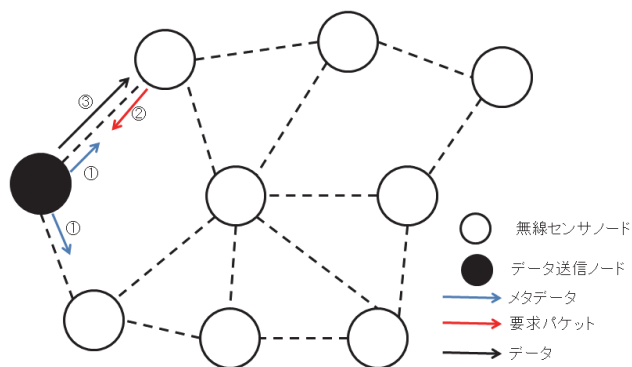


図1 SPINのデータ転送処理

データを送信するノードは、メタデータである広告パケットを近傍ノードに送信する。データに興味のあるノードは、要求パケットを送信ノードに返信する。要求パケットを受信したノードは、実際のデータパケットを送信する。しかし、データ転送の有無に関わらず、メタデータなどの制御パケットのやりとりが発生するため、かえって輻輳が生じる可能性があり、アプリケーションスループットを維持することができない。

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)⁷⁾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

で、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は、十分なセンサノード用意できない場合、省電力化のためアクティブノード数が十分に確保できず、アプリケーションスループットが低下し、センシング精度を維持することができない。

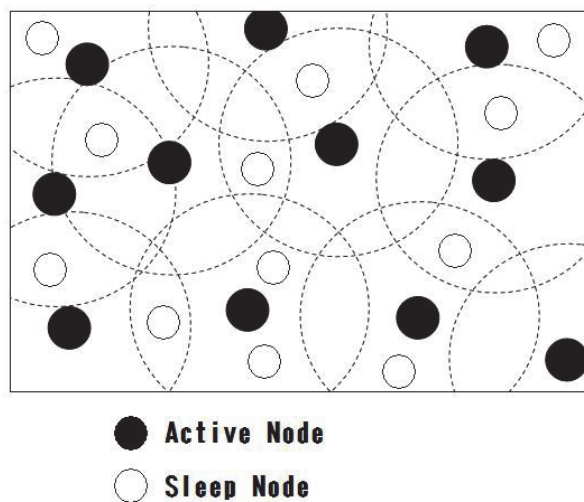


図2 CCPのActiveNodeとSleepNode

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。

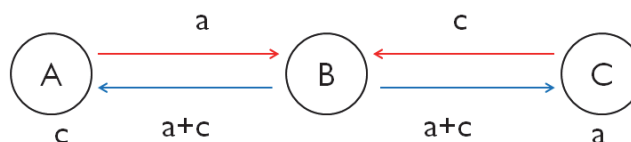


図3 NCの動作

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+cを作成する。符号化パケットa+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+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 を複合することができる。ノード C でも同様に所望のパケット a を復号することが出来る。

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いが、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ですが、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。

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

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

$$R = \frac{Xmit_{NC}}{Xmit_{Unicast}} \quad (3)$$

$$= \frac{\sum_i^{hop-1} i + (hop + 1) \times n}{\sum_i^{hop-1} i + 2hop \times n} \quad (4)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} = \frac{hop + 1}{2hop} \quad (5)$$

$Xmit$ は全ての中間ノードのユニキャスト転送回数、 i は中間ノード数、 hop はホップ数、 n は送信パケット数である。式(1)は NC を適用した通信の全体のパケット送信回数、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 つとホップ数と送信パケット数 n の積となっている。式(1)、(2)より式(4)の送信回数の比率を導く事が出来る。さらに式(4)から送信パケット数を無限大にすると式(5)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、無線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、無線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。また、AODV プロトコルは無線センサネットワークの標準規格である ZigBee⁷⁾において、ルーティング方式として採用されている⁸⁾。

AODV プロトコルの経路探索について以下の図 4 を用いて説明する。ノード 1 からノード 3 へのパケット送信要求があると、ノード 1 は自分の経路表を調べる。経路表に目的ノードへの経路情報が無ければ RREQ(経路要求)メッセージをフラッディングする。その際に自分がフラッディングした 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 を記憶しておく。RREQ メッセージを受け取ったノード 2 は RREQ メッセージ送信元ノードへの経路を作成する。その後 RREQ メッセージをフラッディングする。この RREQ メッセージは送信元であるノード 1 も受信するが、先ほど記憶しておいた情報と比較し、一致しているので破棄する。ノード 3 はノード 2 からの RREQ メッセージ受信後、ノード 1 への経路を作成し、自分が目的ノードであることを知り、RREP(経路応答)メッセージをユニキャストで返し、ノード 2 が中継し、送信元ノード 1 へ到着する。

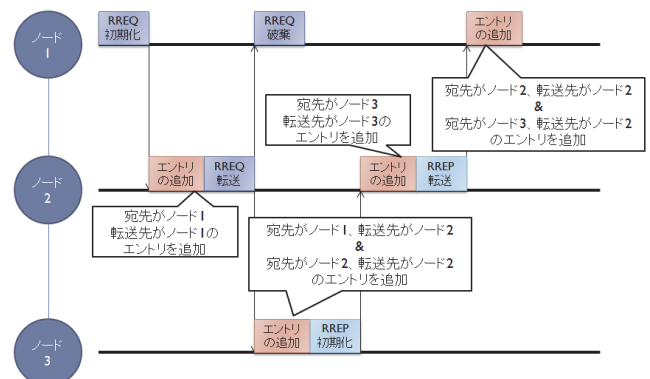


図 4 AODV の経路探索

このようにして双方向の経路が作られる。しかしこれでは、各ノード間の通信経路上の中間ノードが別々のノードが使用される可能性があり、複数の経路が異なるパスを用いることになる。この場合、各経路のパケットが交差することがないため、パケットの NC 機会が少なく、NC による送信回数削減効果が得られない。

3.3 NC 機会を高めるルーティング方式

従来の AODV プロトコルによるルーティングでは、各ノード間の通信経路上の中間ノードが別々のノードが使用される可能性があり、複数の経路が異なるパスを用いることになる。この場合、各経路のパケットが交差することがな

いため、パケットの NC 機会が少なく、NC による送信回数削減効果が得られない。NC 機会を増やすためには、異なる経路間においてもパケットを交差させる必要がある。従って、異なる経路間で2つ以上のパスを共有するように AODV プロトコルを改良する。

3.4 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る。この「重み」は RREQ メッセージを用いて算出される。RREQ メッセージ送信元ノードから直接に RREQ メッセージを受信したノードは、自身の経路表（宛先ノード、転送元ノード、転送先ノード、送信元ノード）内の転送元ノードと受信 RREQ メッセージの転送元ノード（この場合は転送先ノードは送信元ノード）が一致すれば、異なる経路間で1つのリンクを共有している。その場合、一致した経路表を RREQ メッセージ内に入れて転送（ブロードキャスト）する。転送 RREQ メッセージを受信したノードは RREQ メッセージ内の経路表の転送先ノードに自身が含まれる場合は、2つのリンクにより構成されるパスを異なる経路間で1つ共有することになる、これを RREQ メッセージ転送ノードで加算し、この数値をパス共有メトリックとする。このメトリック値が高い程、パス（中継ノード）の共有数が高い。

3.5 提案方式の経路探索

提案方式の経路探索について、図5を用いて説明する。図5はノード1からノード3への送信要求が発生した状況である。

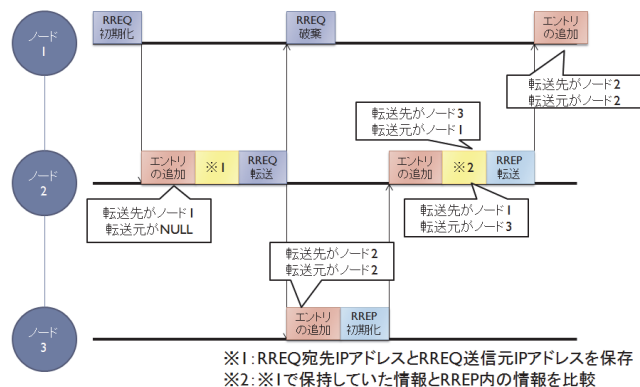


図5 提案方式の経路探索

経路表に新たな項目として転送元ノードを追加する。この転送元ノードの取得方法は、最初に、RREQ メッセージを受信したノード2は、RREQ メッセージ転送元ノードであるノード1を転送先ノードに、転送元ノードは NULL の状態のエントリを仮エントリ(エントリ A 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

ッセージ宛先ノードを一定時間保持する。ノード3は RREQ メッセージを受信後、タイマーを発火させる。タイマー終了後にタイマー起動中に受信した RREQ メッセージの中からホップ数が最小かつパス共有メトリックが最大の経路を選び、RREP メッセージを送信する。次に、ノード2が RREP メッセージを受信した時に、ノード2は RREP メッセージに含まれている RREQ 送信元ノードと RREP メッセージ宛先ノードのペアをエントリ A 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 メッセージ転送元ノードを転送先ノード、転送元ノードはエントリ A の転送先ノードとしたエントリ (エントリ B とする) を作成する。そしてエントリ B の転送先ノードをエントリ A の転送元ノードに置き換え、双方向のエントリとして確定させ、RREQ メッセージ送信元ノードであるノード1に転送する。合致しなければ、エントリ A を破棄し、RREP メッセージは転送しない。以上により、ホップ数が最小でパス共有数を最大とする経路を探索し構成する。

4. 実験と評価

4.1 評価条件

提案方式の評価におけるシミュレーション条件を表1に示す。評価シミュレーションでは、無線通信方式を IEEE802.15.4、ネットワークを IP とすることで実環境利用と同じ構成にし、センシングフィールドは環境モニタリングを想定して、1辺が 500~1000m として考えた。ノード数はランダムに配置し(特定の配置に依存しない)、フィールドを無線(通信最大距離 200m)が 4、5 ホップ(中間ノードで NC が可能な)程度でカバーできる最小ノード数(20 個)に設定した。また、センシングデータ量は秒オーダの周期で数バイト発生すると設定した。この条件にて、AODV と提案方式の NC を使用した場合と NC を使用しない場合のパケット送信数、パケット到達率を比較検証する。

表1 評価条件

フィールドの大きさ	700m × 700m
ノード数	20個
ノード配置	一様乱数
送信パケット数	50個
パケットサイズ	16byte
送信開始時間	10.0s ~ 10.5s間でランダム
送信間隔	1.0s, 2.0s
待機キュー待機時間	500ms ~ 2500ms
無線メディア	IEEE802.15.4(ZigBee)
ルーティングプロトコル	AODV, 提案方式

4.2 評価結果及び考察

パケットの送信間隔が 1.0s のパケット送信回数、パケット到達率を以下の図6、図7に示す。

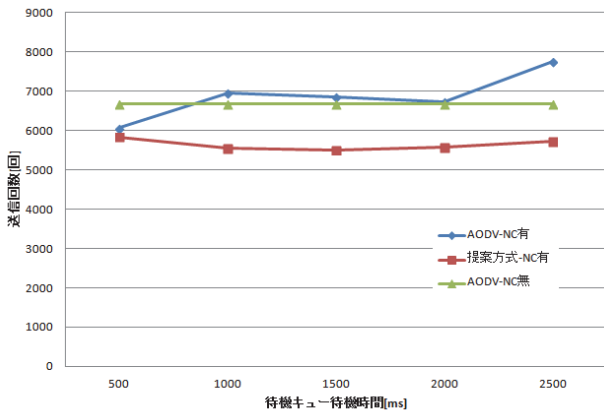


図 6 送信間隔 1.0s 時のパケット送信回数

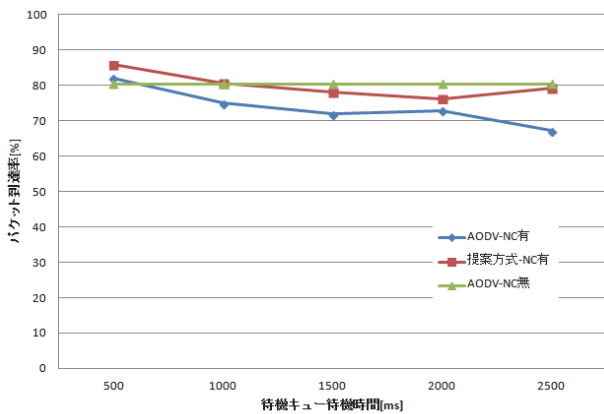


図 7 送信間隔 1.0s 時のパケット到達率

送信間隔が 1.0s のパケット送信回数は、AODV の NC 使用時、NC 不使用時よりも提案方式の NC 使用時が少ない。これは、複数の経路間で異なるパスを共有する提案方式のルーティングにより、中継ノードでのパケットの NC 回数が増え、それによりパケット送信回数が減少したと考えられる。待機キュー待機時間が 2500ms 時に AODV の NC 使用時の送信回数が増えているのは、AODV では、複数の経路間で異なるパスを使用していることから、パケットが待機キューに入っている状態で待機、NC に対応するパケットが到着せず NC が出来ず、待機キューからタイムアウトしユニキャストで送信されるためであると考えられる。

送信間隔が 1.0s のパケット到達率は、待機キュー待機時間が 500ms 時では提案方式の NC 使用時が最も精度が良く、待機キュー待機時間が 1500ms、2000ms 時は、AODV の NC 不使用時より提案方式の NC 使用時が下回った。待機キュー待機時間を長くすると、中継ノードでの NC 回数が多くなり、ブロードキャスト送信を行う機会が増える。しかし、送信間隔が 1.0s のトラフィック量においてはパケット衝突の可能性が比較的高く、ブロードキャスト送信は再送や到達確認を行わないため、NC を実施したパケットをロスしている。すなわち、NC 機会が増えたがトラフィック量が多い場合、逆にブロードキャスト送信の低信頼性からパ

ケット到達度が低下する。また、AODV の NC 使用時が最もパケット到達率が低い。これは、複数の経路間で異なるパスを使用した、つまりネットワーク上で多くのノードが、相互に干渉要因となっている状態となり、衝突が多く発生し、ブロードキャスト通信による NC パケットが損失しているためと考えられる。

パケットの送信間隔が 2.0s のパケット送信回数、パケット到達率を以下の図 8、図 9 に示す。

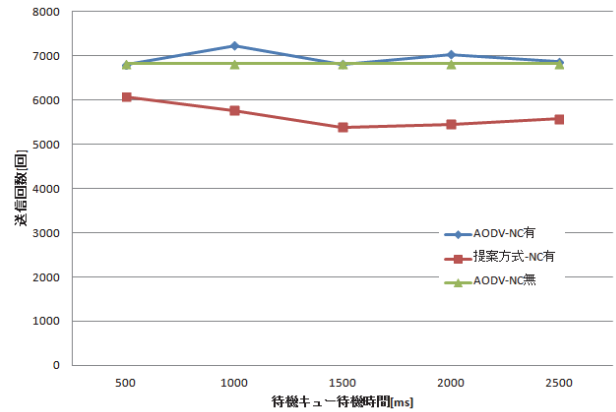


図 8 送信間隔 2.0s 時のパケット送信回数

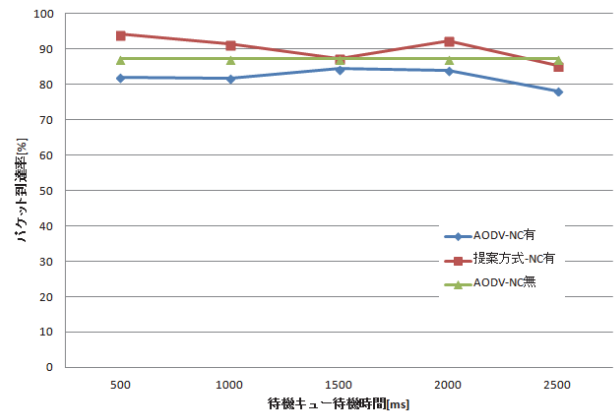


図 9 送信間隔 2.0s 時のパケット到達率

送信間隔が 2.0s のパケット送信回数は、提案方式の NC 使用時が最も少ない。これは、送信間隔が 1.0s の時と同じように、複数の経路間でパスを共有する提案方式のルーティングにより、中継ノードでのパケットの NC 回数が増え、それによりパケット送信回数が減少したと考えられる。

送信間隔が 2.0s のパケット到達率は、送信間隔が 1.0s のパケット到達率よりも全て良い。これは、パケットの送信間隔を延ばすことにより、ネットワークでのトラフィックによる負荷が少なくなったためである。また、提案方式の NC 使用時が最もパケット到達率は高いのは、トラフィック量が少ない場合、複数の経路のトラフィックを同一のパスに集約すると、当然 NC 機会が増えることと、さらに中継ノード数が少なくなりパケット転送が中継ノードで直列化さ

れて、干渉機会が減ることが原因と考えられる。

以上のことから、提案方式は、ノードで発生するトラフィック量が小さく、しかしノード数が多い場合に、複数の経路のトラフィックを同一パスに集約することで、NC機会を増加させて、さらに干渉機会を減少させて、有効に機能することがわかる。

5. まとめ

本論文では、無線センサネットワーク上での利用を想定において、複数の経路間でパスを共有する経路を構成し、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を提案した。さらに、ネットワークシミュレータを用いた送信回数とパケット到達率の評価から、提案方式は、ノード数が多いが、各ノードで発生するトラフィック量が少ない典型的な無線センサネットワークにおいて、以下の特性を持つことを示した。

- 異なる経路間のパスを共有することによるNC機会の増加し全体のパケット送信数を減少させる
- 中継ノードの減少と送信パケット数の減少によりパケット衝突を抑制し、パケット到達率が向上する

以上の結果から、提案方式は、送信回数を減少させ、かつアプリケーションスループットを向上させることが可能である。今後の課題として、提案方式では、異なる経路間のパスを共有した結果、一部のセンサノードに負担が集中し、電力消費が偏ることが問題となる。この点に関しては、パスを共有させた経路を複数記憶するようにし、それを一定周期で使用する経路を変更していくなどの対策を考案する予定である。

参考文献

- 1) G. Kortuem, F. Kawsar, D. Fitton and V. Sundramoorthy : Smart objects as building blocks for the Internet of things, IEEE Internet Computing, Vol.14, No.1, pp.44-51, 2010
- 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, OKI テクニカルレビュー, Vol76, No214, 2009
- 3) 松田 崇弘, 滝根 哲哉 : ネットワークコーディングの技術動向, 独立行政法人情報通信研究機構
- 4) C.Perkins, E.Belding-Royer, S.Das, Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, July 2003
- 5) 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, pp.125-130, 2007
- 6) 安藤 繁, 田村 陽介, 戸辺 義人, 南 正輝, センサネットワーク技術 ユビキタス情報環境の構築に向けて, p128, 東京電機大学出版局, 2005-5
- 7) Xiaorui Wang, Guoliang Xing, Yuanfang Zhang*, Chenyang Lu, Robert Pless, Christopher Gill : Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks