

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 16 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500080

研究課題名(和文) 情報収集型無線センサネットワークのためのネットワークコーディング技術開発

研究課題名(英文) Development of network coding technologies for data gathering wireless sensor networks

研究代表者

太田 能 (Ohta, Chikara)

神戸大学・その他の研究科・教授

研究者番号：10272254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、情報収集型無線センサネットワークにおいて、マルチパス構成あるいはマルチシンク構成とすることでデータ収集の信頼性を高め、かつネットワークコーディング(NC: Network Coding)を適用してパケット中継回数を削減することでシステム寿命への影響を抑えることを試みた。マルチパス構成では、冗長パケットを迂回パスで送信するSTNC方式を、マルチシンク構成では、双方向フローに対するNC適用においてPassive ACKを組み合わせるIFNCPAを提案した。シミュレーション実験等によりその有効性を確認し、センサネットワークのためのネットワークコーディング技術の開発に寄与した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we apply network coding which can reduce the number of packet transfers for multi-path configuration or multi-sink configuration which can increase dependability in data gathering wireless sensor networks. More precisely, STNC (Side Trip with Network Coding) for multi-path configuration and IFNCPA (Inter-Flow Network Coding with Passive ACK) for multi-sink configuration are proposed and the effectiveness of the proposed scheme is verified through simulation experiments, which contributes the development of network coding technologies for sensor networks.

研究分野：情報通信工学

キーワード：センサネットワーク ネットワークコーディング 信頼性 システム寿命 マルチパス マルチシンク

1. 研究開始当初の背景

センサネットワークは、センシング機能を有するノードを介して実世界情報を収集し、アクチュエータを介して実世界へ関与するための基盤通信システムである。センサネットワークは、河川氾濫や森林火災の監視などの防災分野の他、圃場における作物の育成状態や環境のモニタリング、ガス・電気検針のためのスマートメータなどへの応用が考えられており、これらの実現により多くの国民が恩恵を受けると考えられる。現状では、センサネットワークのコンセプトが UCB Smart Dust プロジェクトにおいて発表されてから10年以上が経っているにもかかわらず、これが実用に供され、広く普及するには至っておらず、通信システムとしての低消費電力化技術、高信頼化技術の開発は引き続き重要な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、防災分野やスマートメータなどへの応用が考えられている情報収集型無線センサネットワークを主な対象とする。このタイプのセンサネットワークの運用時においては、ノードの消失や故障などが発生しうる災害時のような過酷な環境下においてセンシング情報を安定して収集し、かつシステム可用性を維持することが求められるため、消費電力の観点からのシステム可用性への影響とパケット送信の冗長性とバランスよく保つことが重要である。

ノードの消失や故障などが発生しうる災害時のような過酷な環境下においてセンシング情報を安定して収集することを可能とするためには、センシングデータをそのコピーとともに複数の経路(パス)に分散させて送信する、あるいは複数のシンクに送信することが有効と考えられる。特に地滑りなどの空間的に相関のあるノード障害に対応するためには、パスはできるだけ分離されていることが望ましい。ただし、このことはそれだけデータを運ぶパケットの中継回数が増え、それに伴うノードの電力消費を増大させる恐れがある。

これに対し、2000年にR. Ahlswedeによって提案されたネットワークコーディング(NC: Network Coding)を使用することで冗長パケット数を削減することでシステム寿命への影響を抑えることができる可能性がある。NCは、ノードにおいて受信した複数パケットにある演算を施し(すなわち符号化し)、その結果としてのパケットを(場合によっては複数ある)次ホップに中継するもので、この演算を通して中継パケットを削減できる可能性がある。

そこで本研究では、主として、マルチパスとNCを組み合わせるアプローチ、ならびにマルチシンクとNCを組み合わせるアプローチにより、情報収集型無線センサネットワークプロトコルの信頼性を向上させることを

試み、その有効性を検証することに取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) マルチパス・NCによる高信頼化

一般に、情報収集型無線センサネットワークでは、シンク(情報を収集するためのノード)に近いノードほどパケット中継の多くなる。このため、シンク周辺のノードのバッテリーは消費しやすい傾向にあり、シンク周辺のノードが使えなくなると、より遠くのあるノードからの情報も収集できなくなる。つまり、シンク周辺のノードのバッテリー消費がシステム寿命を決定づけるといえる。一方、シンクから遠いノードは、パケットを中継することが少なく、たとえパケット中継が増えたとしてもシステム寿命への影響は限定的であると考えられる。

このことに着目し、センシングデータの冗長パケットを迂回パスで送信することで耐故障性の向上を図る情報収集プロトコル ST (Side Trip) 方式、ネットワークコーディングによりシステム寿命への影響を低減する STNC (Side Trip with Network Coding) 方式を開発し、シミュレーション実験により、従来方式である (Sub-branch Multipath routing protocol) と比較することで提案方式の有効性を検証した。さらに、Android 端末に NC を実装して実証実験を行い、その有効性を検証した。

(2) マルチシンク・NCによる高信頼化

シンクを複数設ければ、あるシンクに向かうパス上に障害が発生しても他のシンクから情報を収集できる可能性は残される。このようなマルチシンク構成の情報収集型無線センサネットワークでは、ネットワークのトポロジにより通信フローが交差し、双方向トラヒックが発生するため、NCを適用することにより、中継送信回数を削減して通信の効率を高められることが期待できる。ただし、NCによって符号化されたパケットはブロードキャストによって送信されるため、受信確認応答 (ACK: Acknowledgement) がなされず信頼性が低下する。そこで、Passive ACK (PA) を組み合わせることで通信の信頼性を向上させ、高い信頼性を実現することをねらった IFNCPA (Inter Flow NC with PA) 方式を開発し、シミュレーション実験によりその有効性を検証した。

4. 研究成果

(1) マルチパス・NCによる高信頼化

ST方式は、ノードがセンシングしたデータ(オリジナルデータ)とそのコピーである冗長データを異なる経路でシンクに送信することで空間的に近い範囲にあるノードが一斉に障害にあうような場合において高いデータ収集率を実現することをねらう方式である。オリジナルパケットはシンクに向かう

て最短ホップとなる経路で転送される一方、冗長パケットはシンクから同ホップのノード間でその回数がシステム寿命に影響を与えない範囲で転送され、その後、シンク方向に最短ホップとなる迂回経路で転送される。これにより、オリジナルデータと冗長データは地理的に離れた経路を経て転送される。ただし、冗長パケットが増えるためにシステム寿命への影響が懸念される。

STNC 方式は、異なるノードによってセンシングされた二つの冗長パケットを NC により符号化して一つの冗長パケットにまとめることで、パケット中継回数を削減することをねらったもので、これによりシステム寿命への影響を抑えることが期待できる。

ST 方式ならびに STNC 方式の有効性を検証するために、シミュレーションにより、マルチパス型の従来方式である H-SPREAD ならびに SMRP との比較実験を行った。H-SPREAD 方式は、全ノードがシンクへの最短となるマルチパスを発見するようにパス発見パケットを各ノードが繰り返しブロードキャストする方式で、各ノードは最もホップ数の小さいパスをプライマリパス、次にホップ数の小さいパスをセカンダリパスとして選択することから、パスが空間的に分離されにくい。また、パス発見パケットのサイズが大きく、繰り返しブロードキャストが行われるため、オーバーヘッドが大きい。SMRP 方式は、シンクから 2 ホップ離れたノードをルートとする部分木を構成することで H-SPREAD 方式より小さなオーバーヘッドでのマルチパス構築をねらった方式である。H-SPREAD 方式に比べてマルチパスをもつことができないノードが生じやすく、隣接ノードを利用して冗長パスを構築するためにパスの空間的分離が十分ではない。

図 1 に評価ノード配置とシミュレーション条件の概要を示す。センサノード数は 224 であり、シンクノードは中央に配置されている。空間的に相関のあるノード故障を再現するために、時刻 1700 s にランダムに 2 点を選択され、各点から送信半径 1.5 のノードに一斉に障害が発生するものとした。

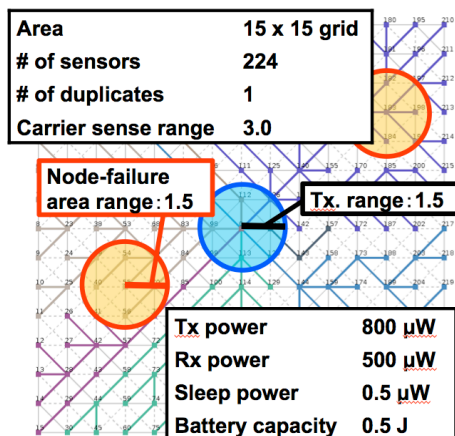


図 1 シミュレーション条件

図 2、3 にシミュレーション結果を示す。図 2 はノード故障が発生しない場合、図 3 はノード故障が発生する場合の時間に対するデータ収集率をそれぞれ表している。図 2 から、STNC はデータ収集率を最も長く保っていることがわかる。これは、NC による冗長パケットが削減されているためと考えられる。また図 3 から、STNC 方式は従来方式に比べてデータ収集率を高く、そしてその状態を長く保っていることがわかる。これは、STNC が冗長パスを空間的に分離されるように形成することに加え、NC により転送パケット数を削減することができるためと考えられる。これらの結果から、マルチパスに NC を組み合わせることの有効性が示されたといえる。

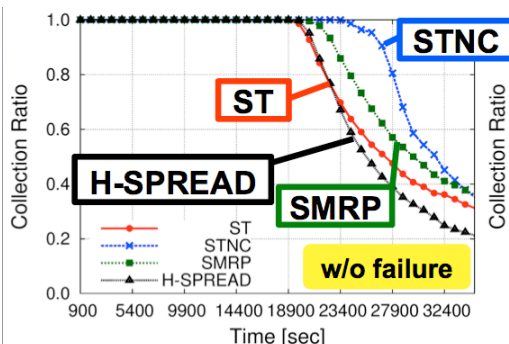


図 2 データ収集率の時間変化 (故障なし)

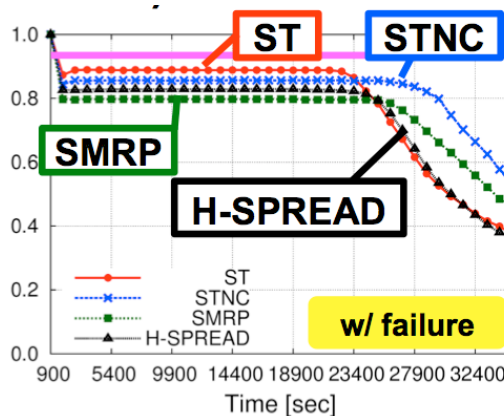


図 3 データ収集率の時間変化 (故障あり)

上記に加え、マルチパスに NC を組み合わせることの有効性を実環境でも検証するために、Android 端末 (Google Nexus S、Android 2.3.6) を用いた実証実験を行った。図 4 右のように端末を配置し、パケットの送信アドレスに基づいてパケットを受信するかどうかを判断することで擬似的に図 4 左のトポロジを形成した。図 5 はパケット収集率、図 6 はシンクの総受信パケット数を表しており、マルチパス構成と NC を組み合わせることで、シングルパスに比べてそれほど送受信パケット数を増加させることなく、高いパケット収集率を実現できることが確認できた。

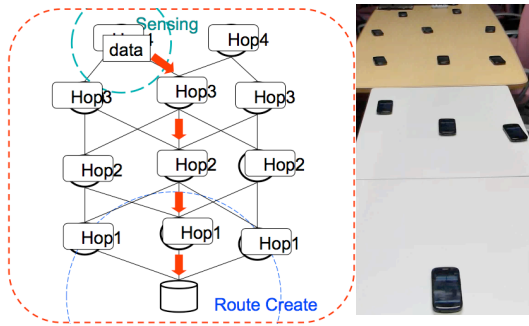


図4 実験におけるトポロジとノード配置

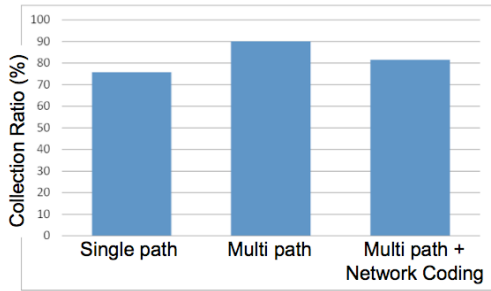


図5 データ収集率特性

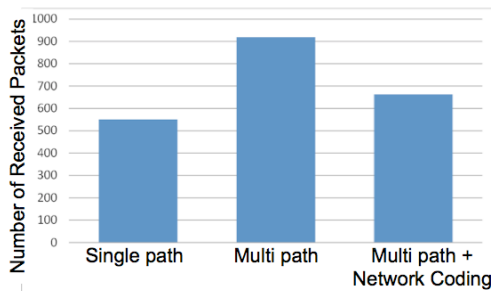


図6 シンクノード総受信パケット数

(2) マルチシンク・NCによる高信頼化

マルチシンク構成をとる情報収集型無線センサネットワークでは、双方向にトラヒックが集中的に流れる状況が発生すると予想される。双方向に流れるトラヒックにNCを適用することでトラヒック量を削減することが期待できる。しかし、線ネットワークでは符号化 packets をメディアアクセス制御層 (MAC 層) でブロードキャストする必要があり、また通常、ブロードキャスト通信ではACKは使用されないため、NCを使用しないユニキャスト通信を用いる場合に比べて信頼性が低くなる。一方、無線マルチホップ通信では、あるノードが送信したパケットが隣接ノードによって中継されたかどうかを傍受することで、隣接ノードにそのパケットが正しく受信されていたかどうかを確認するPAが可能である。IFNCPA方式は、双方向フロー間でのNCにPAを組み合わせたもので、高負荷でもエンド間でのデータ受信を高く保つことが期待できる。

IFNCPAの有効性を検証するために、商用ネットワークシミュレータScenargieにIFNCPA

を実装して性能評価を行った。図7に評価トポロジ、表1にシミュレーション条件を示す。各ソースノードでのセンシングデータが両端のシンクノードにおいて収集される。

図8にシミュレーション結果を示す。ここで、Simple ACKとはブロードキャスト通信を行わずアプリケーション層レベルで受信確認応答を行う方式、UNICASTとはブロードキャスト通信を行わずMAC層レベルで受信応答確認を行う方式、IFNCとはNCは行うがPAを行わない方式である。シミュレーション結果から、IFNCPA方式は負荷に関わらず、高いデータ収集率を実現しており、マルチシンク構成においてNCを組み合わせることの有効性が確認できた。

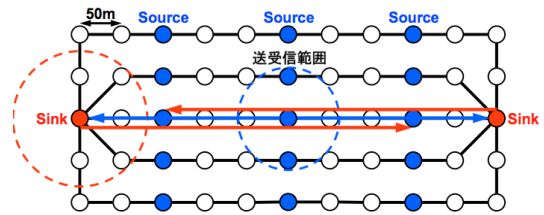


図7 シンクノード総受信パケット数

表1 シミュレーション条件

項目	値
シミュレータ	Scenargie 1.7
プロトコル	IEEE802.11g
ペイロードサイズ	1,000 bytes
ACKパケットサイズ	14 bytes
エンコード待ち時間	75~85 ms
再送タイムアウト	100~120 ms
最大再送回数	3
シミュレーション時間	100 s
試行回数	10

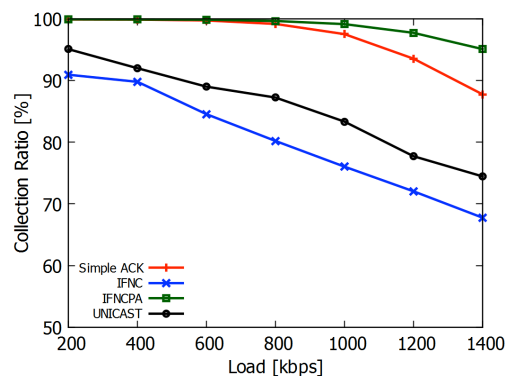


図8 負荷に対するデータ収集率特性

(3) 成果まとめ、関連技術検討、展望

上記に述べたように、単一シンクに対するマルチパス構成ならびにマルチシンク構成に対して、NCを適用することで、高いデータ収集率を達成することができることを明らかにし、学科発表②、③、⑤として公表することで、情報収集型無線センサネットワークのためのネットワークコーディング技術発

展において貢献した。

その他、上記研究に関連するものとして、無線センサネットワークの MAC は、キャリアセンスによってパケット送信を行うかどうかを自律分散的に決定する CSMA 方式がベースになっていることが一般的であり、ノードが高密度に配置された場合、送信電力やキャリアセンス閾値を制御することで、スループットを改善できる可能性について検討し、学会発表④として公表した。また、無線センサネットワークの設計に応用可能な CSMA 方式のスループット推定についても検討し、論文①として公表した。無線センサネットワークを二次元媒体において用いた場合における低消費電力化を実現するための給電方式について検討し、論文②において公表した。また、緊急車両が位置をセンシングデータとしてマルチホップ通信により周辺車両に通知することの効果については学会発表①において公表した。

今後の課題として以下のものがあげられる。IFNCPA 方式においては、ノードが符号化を行うためにパケット受信をどのくらい待つべきか(符号化待ち時間)や、PA における ACK 待ち時間についての検討が必要である。また、ビル火災への避難誘導への応用を考慮した場合、火災等によるノード消失、非常扉開閉による無線伝搬損失変動に起因するトポロジ変化にどのように対応すべきか、など経路制御との連携についての検討が必要である。これらについては、引き続き検討を行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① T. Iwami, I. Roslan, Y. Takaki, K. Yamori, C. Ohta, H. Tamaki, Utility-based Distributed Association Control Scheme with User Guidance for IEEE802.11 Wireless LANs, IEICE Trans. on Communications, 査読有, vol. J98-B, 2015, 15 pages (2015 年 8 月掲載予定)
- ② 手嶋 宏介, 松田 隆志, 張 兵, 稲元 勉, 高木 由美, 太田 能, 玉置 久, 二次元通信システムにおける定在波を考慮した入力点選択型給電方式に関する研究, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, vol. J96-B, 2013, pp. 1342-1354
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j96-b_12_1342

[学会発表] (計 5 件)

- ① H. Minami, A. Kinoshita, Y. Takaki, C. Ohta, H. Tamaki, Performance Evaluation of Emergency Vehicle Travel Support System Based on V2V Communications, International

Conference on Electronics, Information and Communication, 査読有, 2015. 1. 30, シンガポール (シンガポール)

- ② 安藤 誠, 高木 由美, 太田 能, 玉置 久, 無線マルチホップ双方向通信環境のための高効率高信頼パケット伝送プロトコルの評価, 電子情報通信学会モバイルネットワークとアプリケーション研究会, 2014. 9. 12, 河北総合センタービッグバン (宮城県・石巻市)
<http://www.ieice.org/ken/paper/20140912hBqP/>
- ③ K. Fujita, Y. Takaki, C. Ohta, Hisashi Tamaki, Side Trip Multi-path Routing Protocol for Spatial Node Failure Tolerance in Data-gathering WSNs, IEEE the 11th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC2014), 査読有, 2014. 1. 12, ラスベガス (アメリカ)
DOI:10.1109/CCNC.2014.6866603
- ④ 西上 敏生, 高木 由美, 太田 能, 玉置 久, 無線 LAN アクセス網におけるスループット改善のための送信電力制御法に関する一検討, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2013. 10. 17, 北海道大学 (北海道・札幌市)
<http://www.ieice.org/ken/paper/20131017YBgr/>
- ⑤ 藤田 圭佑, 高木 由美, 太田 能, 玉置 久, 情報収集型無線センサネットワークにおける耐故障性を考慮した迂回マルチパス型情報収集プロトコルの提案, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2013. 3. 8, 残波岬ロイヤルホテル (沖縄県・那覇市)
<http://www.ieice.org/ken/paper/20130308CB1f/>

[その他]

ホームページ等

<http://www.al.cs.kobe-u.ac.jp/~ohta/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 能 (OHTA, Chikara)
神戸大学・大学院・システム情報学
研究科・教授
研究者番号: 10272254

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし