

平成22年5月10日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19700059  
 研究課題名（和文）ネットワークコーディングを用いた無線アドホックブロードキャスト通信  
 研究課題名（英文）Wireless Ad Hoc Broadcasting with Network Coding  
 研究代表者 松田 崇弘（MATSUDA TAKAHIRO）  
 大阪大学・工学研究科・准教授  
 研究者番号：50314381

## 研究成果の概要（和文）：

無線アドホックネットワークでブロードキャスト通信を行う場合、ネットワーク中に氾濫する冗長パケットによりリンク帯域や消費電力が浪費されるブロードキャストストーム問題が発生する。本研究では、この問題をネットワークコーディング技術により解決する方式について提案した。ネットワークコーディングでは、中継ノードにパケットの符号化機能を持たせることにより転送パケット数を削減できる。シミュレーション実験により、提案方式の有効性を確認した。

## 研究成果の概要（英文）：

Broadcasting in wireless ad hoc networks results in a serious problem called broadcast storm problem, where serious collision of packets or significant waste of power occurs due to a huge amount of redundant packet forwarding. In order to solve this problem, a broadcasting scheme with network coding was proposed, and its performance was evaluated with simulation experiments. Network coding can reduce the number of forwarded packets by allowing intermediate nodes to encode packets before forwarding.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	720,000	4,020,000

## 研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：ネットワークコーディング，ブロードキャスト，無線アドホックネットワーク

## 1. 研究開始当初の背景

無線アドホックネットワークは、無線端末だけで自律分散的に構成されるネットワーク

であり、各無線端末が他の無線端末から送出されたパケットを互いに中継し合うマルチ

ホップ伝送によりデータ転送が実現される。無線アドホックネットワークには様々な形態があり、ノート PC 等移動端末で構成されるモバイルアドホックアドホックネットワークだけでなく、無線通信機能を持つセンサ端末により構成されるセンサーネットワーク等もその一種と考えることができ、災害時の緊急通信手段等様々な分野での応用が検討されている。無線アドホックネットワークでは、例えば災害時の復旧情報など公共の情報配信や、ルーチングのためのトポロジ情報をネットワーク内に配信する等の目的で、情報をネットワーク上の全ての無線端末宛に送るブロードキャスト通信が必要となる場合がある。

ブロードキャスト通信を実現するための最も単純な手法はフラッディングである。これは、無線端末が新規に受信したパケットをそのまま全ての隣接ノードに送信する方法である。しかし、フラッディングを用いた場合、特に無線アドホックネットワークではブロードキャストストーム問題と呼ばれる深刻な問題が発生する。これは、ネットワーク内部に冗長なトラフィックが氾濫する現象を指し、これにより既に受け取ったパケットの再受信による電力の浪費やパケット衝突の増加が発生する。そのため、冗長パケットの削減方式として、隣接端末数等のネットワークトポロジの情報から転送パケット数を削減する方法や、特定の端末のみがパケット転送を行う方法等、いくつかの検討がなされてきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、無線アドホックネットワークにおけるブロードキャストストーム問題に対し、ネットワークコーディングを用いた冗長パケット削減方式を提案し、性能評価を行うことによりその有効性を示すことを目的とする。

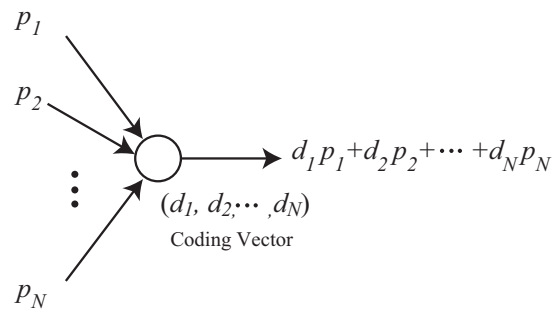


図 1 線形ネットワークコーディング

ネットワークコーディングはルータ等ネットワーク内部のノードでパケット同士の演算を行う技術である。マルチキャストのように複数の受信者が存在する場合には帯域利用効率を向上させることができ、本研究で対象とする無線アドホックネットワークにおけるブロードキャスト通信に適用した場合、ネットワーク内の転送パケット数を削減することができる。

## 3. 研究の方法

ネットワークコーディングでは、一般に複数経路を用いてパケットが伝送され、別経路から同じ中間ノードに到着した複数のパケットは、符号化により一つのパケットに変換されて送出される。本稿では、ネットワークコーディングの符号化方式の中でも、線形符号を用いる線形ネットワークコーディングを用いる。線形符号を用いた場合、図1に示すように、1回の演算対象パケット数を $N$ としたとき、パス上の中間ノードには符号ベクトル $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_N)$ が与えられ、到着パケット $p_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) と線形演算が行われる。このときの出力パケット $p_{out}$ は、

$$p_{out} = \sum_{i=1}^N d_i p_i$$

で与えられる。ここで、 $d_i$  はガロア体 $GF(2^m)$ の要素であり、パケットをガロア体の要素とみなしてガロア体上で行われる。また、上記の演算は多段にわたって行われ、 $p_{out}$  は次の

中間ノードへの入力パケットとして扱われる。

送信ノードから送出された $N$ 個のパケットを $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ で表す。受信ノードで元のパケットを復元するには少なくとも $N$ 個の異なるパケットを受信する必要がある。受信ノードで受信された $N$ 個のパケットを $\mathbf{p}=(p_1, p_2, \dots, p_N)^T$ とする。 $p_i$ は、係数 $\mathbf{c}_i=(c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,N})$  ( $c_{i,j} \in \text{GF}(2^m)$ ,  $1 \leq i, j \leq N$ )を用いて次式で表すことができる。

$$p_i = \sum_{j=1}^N c_{i,j} x_j$$

従って、 $\mathbf{p}$ と $\mathbf{c}_i$ の関係は、次式で与えられる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{C}\mathbf{x}$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{c}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{c}_N \end{pmatrix}$$

このとき、 $\mathbf{C}$ の逆行列 $\mathbf{C}^{-1}$ が存在すれば元の系列 $\mathbf{x}$ を復元可能である。本研究では、各中継ノードに割り当てられる符号化ベクトルをガロア体 $\text{GF}(2^m)$ よりランダムに選択するランダムネットワークコーディングを用いる。

ネットワークコーディングは本来マルチキャストネットワークにおいて、最大フローのスループットで情報伝送を可能とする技術である。しかし、本研究では、スループットを向上させる効果よりも、複数のパケットを集約して1つのパケットとして送出する結果ネットワークコーディングがネットワーク内部で転送されるパケット数を削減するという性質に主眼において、無線アドホックネットワークへの適用を考える。パケット数の削減により、無線端末での消費電力を削減できるだけでなく、MAC層のプロトコルとしてCSMA/CA等のランダムアクセス技術を用いた場合には、フレームの衝突を削減することが可能となる

ため、帯域の浪費を回避することができる。

本研究では、以下の2つの環境に対し、ネットワークコーディングによりブロードキャストストーム問題を解決するための方式を提案する。

- 単一の送信端末から他の全端末へデータを配信するシングルソースブロードキャスト
- 全端末から自身以外への全端末へデータを配信するマルチソースブロードキャスト

前者では、一つの送信端末が複数のパケットをブロードキャストする場合を考える。この場合、送出される全パケットを $N$ 個ずつのグループに分割し、同一グループ内のパケット同士でネットワークコーディングにより符号化を行う。ネットワークコーディングの効果を最大限に発揮するには $N$ の値を適切に決める必要がある。本研究では、計算機上に提案方式を実装し、シミュレーション実験により適切な $N$ についての考察を行った。

後者では、ネットワーク中の全無線端末が1つのパケットを他の全端末にブロードキャストする場合を考える。ただし、各端末は独立かつランダムな時刻にパケットを生成するものとする。本研究では、ネットワークコーディングの効果を最大限に発揮するため、各端末から非同期に送出されるパケットを効率的に符号化することが可能となる非同期マルチソースネットワークコーディングを提案した。

#### 4. 研究成果

本研究で得られた主な成果を以下に述べる。

##### (1) シングルソースブロードキャスト

図2にシミュレーション実験に用いたネットワークを示す。図のように、無線端末をグリッド上に配置し、中心付近に存在する無線端

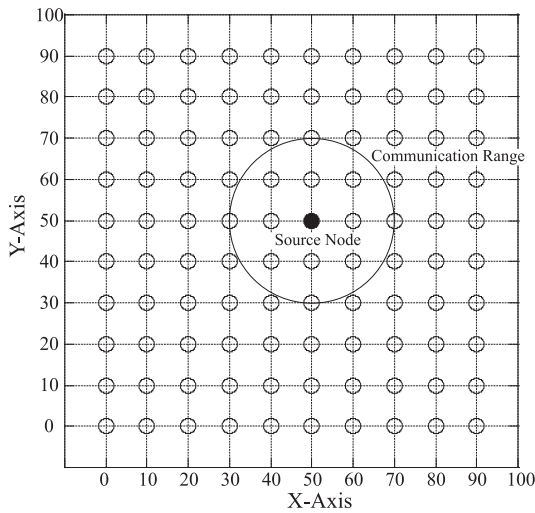


図 2 ノード配置

末の一つを送信端末とする。

図 3 は、ネットワーク中に存在するノード数に対するパケットロス率を示している。図より、以下のことが分かる。ノード数が多い場合には、符号ベクトル長  $N$  を増加させることにより、パケットロス率が大幅に改善されることが分かる。これは、ネットワークコーディングによりネットワーク内の転送パケット数が削減され、その結果パケット同士の衝突回数も抑えられるためである。一方、ノード数が少ない場合には、 $N$  の値を大きくしても必ずしもパケットロス率が改善されない。これは、符号化されたパケットを復号するには、各ノードは  $N$  個のパケットを受信する必要があるが、ノード数が少ない場合には十分な数のパケット数を受信できない場合が発生するからである。

図 4 は、ノード数  $M=100$  の場合に符号ベクトル長  $N$  に対するパケットロス率を示したものである。図より、パケットロス率を最小にする意味で最適な  $N$  の値が存在することがわかる。これは、パケット数の削減効果とネットワークコーディングの復号可能性はトレードオフの関係にあることが原因である。つまり、 $N$  を大きくすればパケット数の削減効果は大きいですが、復号に必要なパケット数が

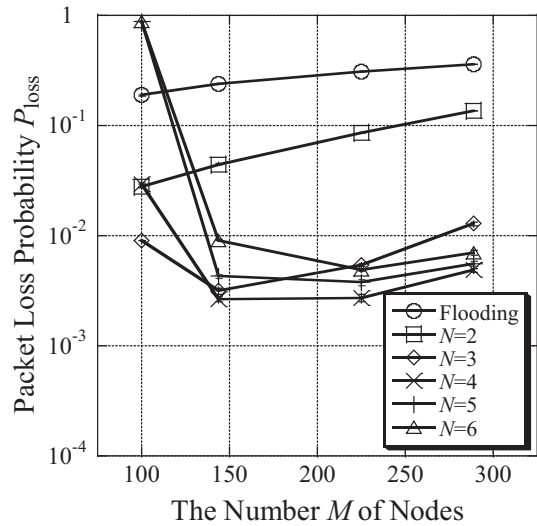


図 3 ノード数に対するパケットロス率

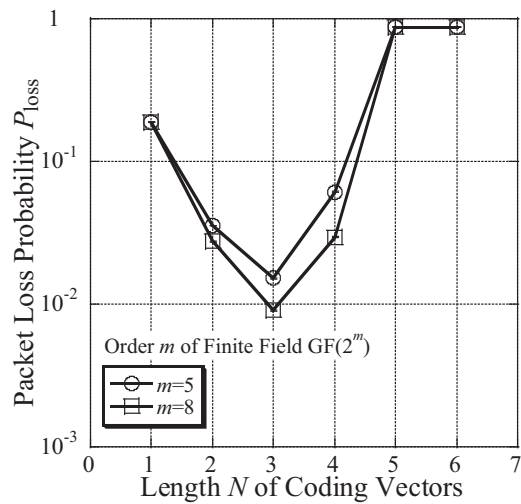


図 4 符号ベクトル長に対するパケットロス率

増加するため、過度に  $N$  を大きくすると復号失敗によりパケットロス率が増加する。

## (2) マルチソースブロードキャスト

マルチソースブロードキャストにおいても、図 2 に示すようにグリッド上にノードを配置するが、シングルソースブロードキャストとは異なり、各無線端末が 1 つずつパケットを発生し、自身以外の全無線端末に対してパケットを配信する。また、提案方式に対する比較方式として、確率的フラッディングを

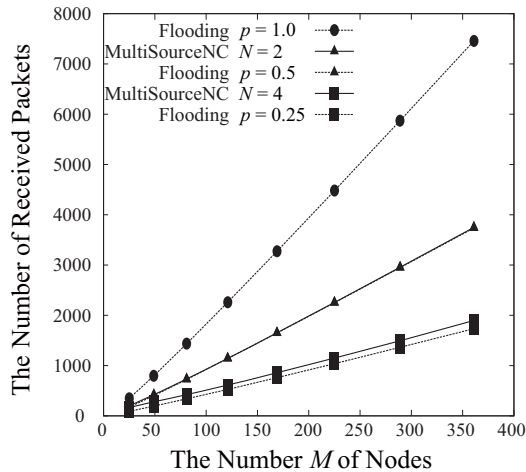


図 5 ノード数に対する受信パケット数

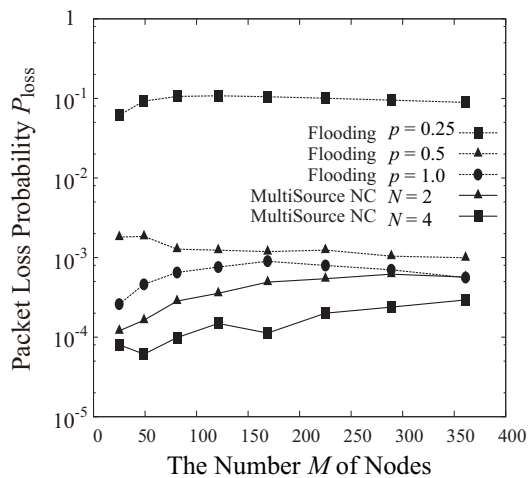


図 6 ノード数に対するパケットロス率

導入する。この方法では、他の無線端末において生成されたパケットを受信したノードは確率  $p$  でそのパケットを転送する。

図 5 はノード数に対する受信パケット数を示している。ただし、受信パケット数は、各ノードで受信された平均パケット数を示している。図より、 $p = 0.5$  と  $p = 0.25$  の確率的フラッディングは、それぞれ  $N = 2$  と  $N = 4$  の提案方式と同程度転送パケット数を削減できていることが分かる。図 6 は、ノード数に対するパケットロス率を示している。図より、パケット数の削減効果は同程度であるが、確率的フラッディングよりも提案方式の方がパケットロス率の改善効果が大いこと

がわかる。これは、提案方式では、1 つの符号化パケットに複数のパケットの情報が含まれているため、1 回の復号で複数個のパケット受信が可能となるためである。

#### 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 Takahiro Matsuda and Tetsuya Takine, "Multicast Communications with Reed Solomon/Network Joint Coding in Wireless Multihop Networks," Journal of Communications, 査読有, Vol. 4, No. 11, pp. 856-864, Dec. 2009.
- ② Takahiro Matsuda, Taku Noguchi, and Tetsuya Takine, "Broadcasting with Randomized Network Coding in Dense Wireless Ad Hoc Networks," IEICE Transactions on Communications, 査読有, Vol. E91-B, No. 10, pp. 3216-3225, October 2008.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 西川由明, 松田崇弘, 滝根哲哉, "一般トポロジを持つネットワークにおけるリンクロス率最尤推定法," 信学技報, vo. 109, no. 449, IN2009-196, pp. 313-318, 2010 年 3 月.
- ② 南 圭祐, 野口拓, 松田崇弘, 滝根哲哉, "マルチソースネットワークコーディングを用いた無線ブロードキャストの性能改善," 信学技報, Vol. 109, No. 37, IN2009-2, pp. 7-12, 2009 年 5 月.
- ③ 松田崇弘, "ネットコーディングを用いたリンクロス最尤推定法," 信学技報, Vol. 109, No. 37, IN2009-1, pp. 1-6, 2009 年 5 月.
- ④ 山脇康史, 松田崇弘, 滝根哲哉, "疎密度モバイルアドホック網における XOR 演算を用いた転送方式," 信学技報, Vol. 108, No. 458, IN2008-180, pp. 285-290, 2009 年 3 月.
- ⑤ 松田崇弘, 滝根哲哉 "線形ネットコーディングとリードソロモン消失訂正符号を用いた高効率ロバスト無線マルチキャスト通信," 信学技報, Vol. 108, No.

286, NS2008-98, pp. 57-62, 2008年11月.

- ⑥ 松田崇弘, "ネットコーディングを用いた高信頼無線通信," 信学技報, Vol. 108, No. 231, WBS2008-29, pp. 9-12, 2008年10月.
- ⑦ 南圭祐, 野口拓, 松田崇弘, 滝根哲哉, "無線ブロードキャストのためのマルチソースネットワークコーディング," 信学技報, Vol. 108, No. 204, IN2008-54, pp. 63-68, 2008年9月.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松田 崇弘 (Matsuda Takahiro)  
大阪大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 50314381