

アドホックネットワークにおける適応型ネットワークコーディングを用いたマルチキャスト通信

野口 拓^{1,a)} 林 直秀²

受付日 2016年3月23日, 採録日 2016年10月4日

概要: アドホックネットワークでは端末電池容量, 帯域などのネットワーク資源が限られているため, マルチキャスト通信を行う場合, 不要なパケット転送を削減しネットワーク資源や電力の浪費を抑えることが重要である. 本論文では, アドホックネットワークにおいて, ネットワークコーディングを用いて, 不要なトラフィックを削減しマルチキャストを効率的に実現する方法を提案する. 提案方式では, 各端末が隣接ノード数に応じて動的符号化数制御を行い, 自律的に再送・中継中止要求を行うことで, 配送率の低下を抑えながら再送による遅延やトラフィックの増加を軽減できる. 計算機シミュレーションおよび Android 端末を用いた実験を行い, 提案方式の性能が, 既存方式と比較して, 配送率, 遅延, トラフィック量の点で向上することを明らかにした.

キーワード: ネットワークコーディング, マルチキャスト, アドホックネットワーク

Multicast with Adaptive Network Coding in Mobile Ad hoc Networks

TAKU NOGUCHI^{1,a)} NAOHIDE HAYASHI²

Received: March 23, 2016, Accepted: October 4, 2016

Abstract: For multicast communications in ad hoc networks, it is very important to reduce redundant packet transmissions in order to suppress network resource consumption and save limited battery power of nodes. In this paper, to deal with this problem, we propose a new multicast scheme with network coding which can reduce the number of packets transmitted in the network by encoding multiple packets into a single coded packet. In the proposed multicast scheme, each node changes the length of coding vector and conducts pruning of redundant relay nodes according to the number of its neighboring nodes. Our multicast scheme also has a retransmission function among nodes and can reduce delay and redundant traffic while keeping high delivery rate. To investigate performance of our scheme, it is compared with an existing multicast schemes through computer simulations and experiments with real Android tablets. Our simulation and experimental results show that our scheme outperforms the existing schemes from the viewpoints of packet delivery rate, delay and traffic.

Keywords: network coding, multicast, ad hoc networks

1. はじめに

固定インフラを必要とせず, 各端末が相互に無線接続さ

れることでネットワークを形成するアドホックネットワークは, 場所や設備の制約を受けずに柔軟にネットワークを構築できるため, その特徴を活かした様々なアプリケーションが考えられている. たとえば, 大規模広域災害発生時に, インフラレスで容易に敷設可能なアドホックネットワークを通信手段として, 避難情報や被災状況の通知などを行うことなどが検討されている. このようなアプリケーションでは, アドホックネットワークを用いて同一情報を特定の多地点へ確実に同時配信する必要があるため, マル

¹ 立命館大学情報理工学部
College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

² 立命館大学大学院情報理工学研究科
Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

a) noguchi@is.ritsumeikan.ac.jp

チキャスト通信の利用が適している。アドホックネットワークでは端末電池容量、帯域などのネットワーク資源が限られているため、マルチキャスト通信を行う場合、不要なパケット転送を削減しネットワーク資源や電力の浪費を抑えることが重要である。

アドホックネットワークにおいて、ネットワークコーディング [1] (以下 NC) を用いて、不要なトラフィックを削減しマルチキャストを効率的に実現する方法が検討されている [3], [5], [7], [10]。NC とは、ネットワーク内部でパケットに対し線形演算を行うことで複数のパケットを単一のパケットに符号化し送信する技術である。端末の移動によってトポロジが変化するアドホックネットワークにおいては、フラッディングを用いることで配送率の高いマルチキャスト通信を実現できるが、冗長なトラフィックがネットワーク全体に汎濫し、ネットワーク負荷が増大するという問題 [2] がある。この問題に対し、NC を使用することで、冗長なトラフィックを削減しネットワーク負荷を低減させることが可能となる。しかし、NC ではパケットがネットワークを転送される過程で符号化によってパケット数が減少するため、送信ノードから受信ノードまでのホップ数やネットワーク内で生じるパケットロスが配送率や遅延に大きく影響する。既存の NC を用いたマルチキャスト方式は、符号化数を固定しているため、アドホックネットワークの特徴であるネットワークの動的変化に十分に対応できない。受信ノードの隣接ノード数が符号化数よりも小さくなった場合には復号ができず配送率が大きく悪化し、再送による遅延の増加を招く場合がある。

そこで本論文では、端末の移動によるネットワークの局所的なノード数変化に対応するため、動的な符号化制御を行い端末の移動によって起こる局所的な配送率の低下を軽減する方式を提案する。提案方式では、各ノードが自身の隣接端末数の変化に応じて動的な符号化数制御を行い、さらに、自律的な再送・剪定制御を行うことで、配送率の低下を抑えながら再送による遅延やトラフィックの増加を軽減する。提案方式の有効性を検証するため、ネットワークシミュレータを用いて既存方式との性能比較を行う。さらに、Android 端末を用いた実装実験を行い、提案方式の通信性能評価を行う。

2. 関連研究

アドホックネットワークにおけるマルチキャスト通信技術に関する既往研究は、1) マルチキャスト方式、2) ブロードキャスト方式、3) NC 方式、の 3 つに分類される。マルチキャスト方式は、送信者と受信者群とをつなぐ配信経路を動的に設定してデータ配信を行う方式であり、通信トラフィックの点では最も効率的な方式である。しかし、無線端末の参加離脱・移動が激しい流動的なネットワークではデータ配信経路の最適化が困難であり、データ配送率の低

下を招く。ブロードキャスト方式は、冗長なパケット転送によって高いデータ配送率が得られる反面、膨大な通信トラフィックが発生しパケット衝突や消費電力の増大を招く。また、不必要な端末にまでデータが転送されてしまうため、安全性が低下するという問題もある。NC 方式は、ネットワークコーディングを応用した新しい方式で、ブロードキャストで発生する膨大な通信トラフィックをネットワーク内で符号化・圧縮することで削減する。本論文の提案方式は、NC 方式に分類される。

NC 方式の 1 つである CodeCast [3] は、ランダムネットワークコーディング (RNC) [4] を用いてアドホックネットワークにおいてマルチキャストを実現する方式である。CodeCast では、転送に不要なノードの剪定を行うことで、冗長な通信を抑制し、さらに再送制御により信頼性の高いマルチキャスト通信を実現している。しかし、NC の符号化数が固定であるため、ネットワークの動的な変化に追従できず、ノードの移動性が高いネットワークでは性能が低下する。

MBMNC [5] は、マルチキャスト経路制御プロトコル ODMRP [6] に NC を組み合わせた方式で、多数の隣接ノードを持つノードが高確率で符号化を行う。接続性の高いノードのみが符号化を行うことで、ノード移動性による符号化・復号化失敗を低減させている。MBMNC の符号化数は 2 に固定されており、接続性の高いノードにおける符号化によるパケット削減効果は限定的である。

MSNC [7] は、フラッディング方式と NC 方式を組み合わせたもので、異なる送信ノードから生成されたパケットどうしを符号化することで、ネットワーク内のパケット数削減を実現している。MSNC は、複数のマルチキャスト通信間にまたがる符号化であるため、単一マルチキャスト通信には適用できない。

Pacifier [8] は、ワイヤレスメッシュネットワークにおいてマルチキャスト方式と NC 方式を組み合わせて信頼性マルチキャストを実現する方式である。Pacifier は、完全な信頼性を保証するため、マルチキャスト送信ノードがすべてのマルチキャスト受信ノードに対する再送責任を負い、送信ノードの負荷が非常に高い。また、静的ネットワークのみを想定し、符号化数も固定であるためネットワークトポロジの動的変化には対応できない。

CodePipe [9] は、Pacifier と同じくワイヤレスメッシュネットワークにおいてマルチキャスト方式と NC 方式を組み合わせて信頼性マルチキャストを実現する方式である。CodePipe では、送信ノードに加えて、受信ノードも再送責任を負う部分が Pacifier とは異なる。また、ノードの移動には対応できないがノードの参加離脱には対応している点も Pacifier より優れている。しかし、符号化数は固定であるため、ネットワークトポロジの変化に対しては、符号化数の変更ではなく経路再構築で対応することになる。こ

のため、トポロジ変化の激しいネットワークでは、遅延の増加や再送トラヒックの増加を招く。

3. ネットワークコーディング

NCとは、ネットワーク内部での複数のパケットを単一パケットに符号化する技術である。図1(a)に示すように、中間ノードIで受信された複数のパケット $r_1 \dots r_N$ を符号化によって単一パケット p_{out} に変換し転送することにより、冗長なパケットを削減することができる。図1(b)にNCの符号化例を示す。送信ノードSが、2つの情報パケット p_1, p_2 を受信ノード R_1, R_2 にマルチキャストする場合を考える。NCを用いない場合、中間ノードCは p_1, p_2 それぞれのパケットを転送するため、転送処理が2回発生するのに対し、NCを用いる場合、中間ノードCは符号化パケット $p_{out} = c_1p_1 + c_2p_2$ を生成し転送するため転送処理が1回でよい。ここで、 (c_1, c_2) は符号化ベクトルであり、符号化ベクトルと受信パケットの線形演算により符号化パケットを生成する。符号化パケット p_{out} を受信したマルチキャスト受信ノード R_1 および R_2 は、それぞれ中間ノードAおよびBから受信しているパケット p_1, p_2 と符号化パケット p_{out} を用いて復号化を行い、 p_1, p_2 を復元することができる。ただし、復号化には少なくとも符号化数分(この例では2)のパケットを受信する必要がある。

一般に、 N 個の情報パケットに対しNCを適用する場合を考える。あるノードで受信された N 個のパケットを $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_N)$ とすると、この端末から送出される符号化パケット p_{out} は、係数 c'_i ($i = 1, 2, \dots, N$)を用いて次式で表される。

$$p_{out} = \sum_{i=1}^N c'_i r_i \quad (1)$$

NCでは、あるノードから送出された符号化パケットは、他のノードにおいて別の符号化パケットとともに繰り返し符号化されるため、式(1)は、送信ノードの生成した情報パケット $p_1 \dots p_N$ を用いて次式のように表すことができる。

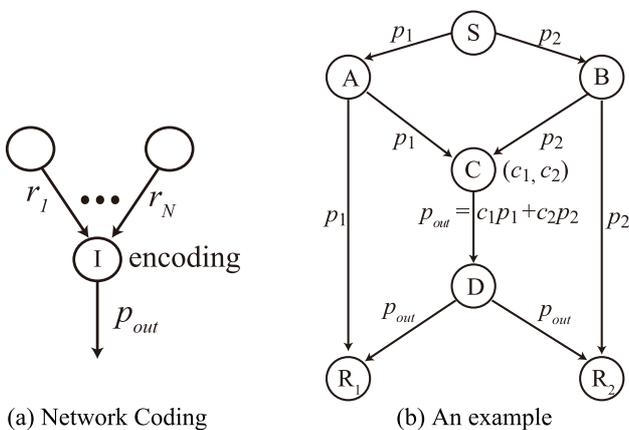


図1 ネットワークコーディング

Fig. 1 Network coding.

$$p_{out} = \sum_{j=1}^N c_j p_j \quad (2)$$

受信ノードにおいて、すべての情報パケットを復号するには、少なくとも N 個の符号化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 個の符号化パケットを $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_N)$ とすると、 \mathbf{r} は $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_N)$ と行列 \mathbf{C} を用いて $\mathbf{r} = \mathbf{p}\mathbf{C}$ と表すことができる。ただし、 $\mathbf{C} = (\mathbf{c}_1 \ \mathbf{c}_2 \ \dots \ \mathbf{c}_N)$ であり、 $\mathbf{c}_i = (c_{i,1} \ c_{i,2} \ \dots \ c_{i,N})^T$ は符号化パケット r_i を構成する符号化ベクトルである。このとき、 \mathbf{C} の逆行列 \mathbf{C}^{-1} が存在すれば、受信ノードで情報パケット \mathbf{p} を復号可能である。復号処理は、以下の式で表すことができる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{r}\mathbf{C}^{-1} \quad (3)$$

本論文では、各ノードにおいて符号化に用いる係数をガロア体 $\mathbf{GF}(2^m)$ の要素からランダムに選択するRNC[4]を用いる。ただし、 m はガロア体の位数である。RNCを用いる場合、復号を行うため受信ノードに符号化ベクトルを通知する必要がある。本論文では、次節で説明するように、パケットのヘッダ内に符号化ベクトルを格納することによりこれを実現する[10]。

4. 適応型ネットワークコーディング

RNCを用いたマルチキャストにおいて、受信ノードが復号を行うためには符号化時に使用したパケット数(符号化数 N)以上の符号化パケットが必要である。ノード移動による隣接ノードの減少やパケットロスによって、受信ノードにおいて復号に必要な符号化パケットが不足する場合には、再送が必要となりトラヒックの増加を招く。受信ノードにおける符号化パケット不足を回避し再送を抑制するためには、符号化数を適切に設定する必要があるが、移動性の高いアドホックネットワークにおいて事前に最適な符号化数を定めることは難しい。そこで本論文では、各ノードが周囲の状況に応じて動的に符号化数を決定することによって、ネットワーク状況の変化に対応した効率的なマルチキャストを実現する方式を提案する。提案方式では、符号化数を周囲のノードのうち最も隣接ノード数が少ないノードに合わせて動的に変化させる。隣接ノード数が少ないノードと隣接している場合は符号化数を減少させ、隣接ノード数の多いノードと隣接している場合は符号化数を増加させたいうで符号化し送信することで復号失敗やパケットの衝突によるパケットロスを低減する。

図2は、提案方式の動作例を示している。図2では、送信ノードSが4つの情報パケットを受信ノード $R_1 \sim R_3$ へ送信している。図中の矢印は、パケットの流れを表しており、実際の通信では無線同報性により1回のパケット送信で通信範囲内にいるすべてのノードにそのパケットが到着

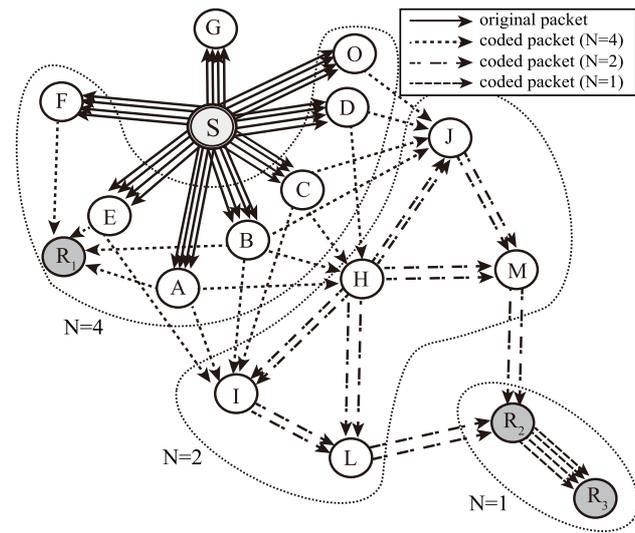


図 2 適応型ネットワークコーディング
 Fig. 2 An example of adaptive network coding.

する。まず、S は 4 つの情報パケットを送信し、S の通信範囲内にある A~G は受信した 4 つのパケットを RNC を用いて符号化数 $N = 4$ で符号化し、生成した単一の符号化パケットを送信する。R₁ は、受信した 4 つの符号化パケットを用いて復号化を行い、4 つの情報パケットを取得する。H も 4 つの符号化パケットを受信するが、自身の隣接する L, M の隣接ノード数に合わせて符号化数を $N = 2$ に変更する。H は受信した 4 つの符号化パケットを復号し、 $N = 2$ で再符号化したうえで、2 つの符号化パケットを転送する。R₂ においても符号化数の変更が行われ、R₂ は受信した 4 つの符号化パケットを復号し、 $N = 1$ で再符号化したうえで 4 つの符号化パケットを送信する。R₃ は受信した 4 つの $N = 1$ の符号化パケットを用いて復号する。図 2 のようなネットワークで従来の方式を使用する場合、ネットワーク全体の符号化数を隣接ノード数の最も小さいノードに合わせる必要があるが、提案方式を用いることで局所的な符号化数制御が可能となる。

一般に、NC を用いたマルチキャストでは、受信ノードのみが復号を行い、受信ノードではない中継ノードは復号を行う必要はない。しかし、提案方式では中継ノードにおいて符号化数変更を行う必要があるため、中継ノードにおいても復号を行い、その後再符号化する。提案方式では中継ノードで復号および再符号化を行うことで、中継ノードで復号を行わずに符号化パケットの転送のみ行う場合、および、受信した符号化パケット (≠ 情報パケット) の一部を用いて再符号化を行い、それを転送する場合と比較して、各ノードにおいて線形独立な符号化パケットを短時間で入手可能である。例として、 $N = 4$ で符号化された 4 つの線形独立な符号化パケットを受信した中継ノードがパケットを 1 つ送信する場合を考える。中継ノードで復号を行わずに符号化パケットの転送のみ行う場合では、中継ノード

は受信した 4 つの符号化パケットのうち最初に受信したもの、あるいは、4 つから 1 つを選択して送信する。受信した符号化パケットの一部を用いて再符号化し転送する場合は、中継ノードが 2~3 つの符号化パケットを受信した時点で再符号化によって新たな符号化パケットを 1 つ生成し送信する。提案方式では、中継ノードが 4 つの符号化パケットを受信した後、復号を行い再符号化によって新たな符号化パケットを 1 つ生成し送信する。これら 3 つの方式は、4 つの符号化パケットを受信しネットワークに対して 1 つの符号化パケットを送信しているという点で同じであるが、提案方式では新たな符号化パケットを持つ符号化パケットをネットワークへ送信する確率が高まるため、各ノードにおいて線形独立な符号化パケットをより短時間で収集しやすくなる。さらに、提案方式では、中継ノードが復号済みパケットを一定期間保持し、他ノードからの再送要求に対し送信ノードに代わって再送を行う。これにより、提案方式では、中継ノードが復号を行わない方式と比べ、パケットロス発生時の再送を迅速に行うことが可能となる。

4.1 送信処理

提案方式は、ネットワーク層で動作する。送信ノードでは、上位層から渡されたマルチキャストデータを同一サイズのパケット (情報パケット) に分割し、 N 個の情報パケットが揃った時点で符号化を行う。符号化パケットにはグループ識別子 (*groupid*) を付加し、グループ識別子によって符号化パケットが属する符号化グループを識別する。グループ識別子はシーケンス番号の役割も持ち、 N 個のパケットごとに $groupid = groupid + N$ で更新される。

送信ノードでは、生成した N 個の符号化パケットを送信する。符号化パケットを $P_{out}(groupid, N)$ 、符号化ベクトルを c_k ($k = 1, 2, \dots, N$)、情報パケットを $p_{(i)}$ (i : パケット番号) とすると、符号化処理は次の式で表すことができる。

$$P_{out}(groupid, N) = \sum_{k=1}^N c_k P(k-1+groupid) \tag{4}$$

$$c = (c_1 \ c_2 \ \dots \ c_N)$$

ここで、 c_k は符号化係数であり、ガロア体 $GF(2^m)$ の要素からランダムに選ばれる。 c は符号化ベクトルである。

符号化ベクトル c , *groupid*, および N は、符号化パケットのヘッダに格納される。また、送信ノードからのホップ数 (*hops*) もパケットヘッダに格納され、各ノードにおいて、隣接ノードが自身から見て送信ノード側 (上流) に位置するか、あるいは送信ノードと反対側 (下流) に位置するかの識別に利用される。

4.2 符号化数動的変更処理

各ノードは隣接上流ノード (一定時間以上パケットを送信し続けている上流ノード) 数 M を監視し、符号化パ

ケット送信時に M をヘッダに格納する。隣接下流ノード（送信ノードからのホップ数が自身より大きいノード）から受信した符号化パケットに記載されている M のうち最小値を M_{min} とし、 $M_{min} > N + \Delta_U$ が成立すると、符号化数を $N = N++$ に変更する。 $M_{min} < N$ となった場合は、符号化数を $N = M_{min}$ に変更する。なお、初期状態は $N = M_{min} = 1$ とする。 Δ_U は、符号化数に対する冗長な隣接上流ノード数に対応しており、 M_{min} の変化幅が $\Delta_U + 1$ 以内であれば、符号化数の変更は行わない。ネットワークの移動性に応じて Δ_U を適切に設定することで、ネットワークの変化に対して符号化数変更処理が敏感に反応しすぎるのを防ぐことができる。

符号化数動的変更処理の動作例を、図2のネットワークを用いて説明する。ここで図2の状態とは異なるが、マルチキャスト開始直後はすべてのノードにおいて $N = 1$ で送信が行われているものとする。時間経過に従って各ノードの M_{min} は更新され、ノード H~J は、下流ノード L, M が送信したパケットから $M_{min} = 2$ であることを把握する。この時点で、ノード H~J において $M_{min} > N + \Delta_U$ が成立するため*1、符号化数を $N = 2$ に増加させる。その後、ノード J のネットワークからの離脱によってノード M の上流ノード数が1に減少する場合を考える。この場合、ノード H の保持する M_{min} は1となり $M_{min} < N$ が成立し、ノード H は符号化数を $N = 1$ に減少させる。一方、ノード J の離脱はノード L には影響を及ぼさないため、ノード I の保持する M_{min} は2のままであり、ノード I は符号化数の変更は行わない。

4.3 中継処理

中継ノードは、同じグループ識別子を持つ符号化パケットで、なおかつ符号化ベクトルが線形独立であるパケットが N 個以上集まるまで受信パケットをバッファに格納する。 N 以上のパケットが集まった時点で復号を行う。提案方式では、中継する際に1度復号し再符号化を行うため、符号化パケットどうしの演算は行わない。中継ノードにおいて式(3)の演算により復号されたパケットは、送信ノードと同様に式(2)の演算により再符号化され、ブロードキャストで送信される。このとき、復号に用いた N 個の受信パケットのヘッダに記載されている *hops* の最小値に1加算した値を、新たな *hops* として再符号化パケットのヘッダ内に記載する。同一符号化グループに属するパケットの重複送信を避けるため、送信済み符号化グループのパケットについては、再度受信しても破棄する。符号化数の異なる符号化パケットを受信した場合でも、合わせて N 以上の線形独立な符号化パケットが集まっていれば、符号化ベクトルの差は0ベクトルで埋めた後、式(3)の演算によ

り復号が可能である。

4.4 再送処理

パケットロスや線形従属である符号化パケットを受信した場合など、各ノードが N 以上の符号化パケットを受信できなかった場合には、再送要求を行う。各ノードは、一定時間ごとにバッファ内で復号が完了していない同一グループ識別子を持つ符号化パケット数をカウントする。このとき、復号のために不足しているパケットが規定数 N_{unrecv} 以上であれば、復号に必要なパケット数、符号化数、およびグループ識別子を記載した再送要求パケットをブロードキャストする。再送要求メッセージを受信したノードは、再送要求されている符号化グループの復号が完了している場合、ランダム時間待機後に当該符号化グループの復号済み情報パケットを要求個数分ランダムに選択し、ブロードキャストで再送する。再送要求メッセージを受信したノードの再送待機中に、当該グループの再送パケットを受信した場合は、近隣ノードによって再送が行われたと判断し、待機中の再送を中止する。ブロードキャスト再送を用いることにより、再送要求元ノード以外のノードにおける当該符号化グループの復号に貢献できる。また、復号済み情報パケットを再送することで、符号化数の異なる復号未完了ノードが当該再送パケットを受信した場合でも、複雑な復号処理を必要とせずに復号が可能となる。再送要求メッセージあるいは再送パケットがロスした場合には、再送要求元ノードにおいて復号が完了しない。この場合、再送要求元ノードにおいて一定時間ごとに行われる不足パケット数の確認時に再度再送要求パケットの送信が行われることとなる。

4.5 接ぎ木処理

マルチキャストの新規受信ノードおよび中継ノードで、 $M < N + \Delta_G$ を満たしているノードは中継開始要求パケットをブロードキャストし、自身の周囲のノードにパケットの中継を要求する。中継開始要求パケットを受信したノードは中継開始応答パケットをユニキャストで送信元へ返信する。中継開始要求パケットを送信したノードは、

$$M + \text{受信} \text{中継} \text{応答} \text{パケット} \text{数} \geq N + \Delta_G \quad (5)$$

を満たすまで応答パケットの受信を続ける。中継開始要求を行ったノードは、応答パケットを送信したノードに対して、確認パケットをユニキャストで送信する。確認パケットを受信したノードは、新たな中継ノードとしてパケットの中継を開始する。なお、中継開始要求パケットを送信したノードは、式(5)を満足した時点で、それ以降に到着した応答パケットに対しては確認パケットの送信を行わない。もし、中継開始要求パケットを受信したノードがマルチキャスト受信ノードもしくは中継ノードでない場合は、

*1 ただし、図2の例では $\Delta_U = 0$ とする。

中継開始応答パケットを返信できないため、自身を送信元とする中継開始要求パケットを新たに作成し送信する。その後、自身の接ぎ木処理が完了した時点で、保留していた中継開始応答パケットの返信を行う。

4.6 剪定処理

提案方式では、不必要なノードの中継処理を抑制することで不要なトラフィックが発生することを防いでいる。各ノードは受信した符号化パケットの送信元アドレスを監視し、一定時間以上連続して受信できた符号化パケットの送信元ノードを隣接ノードと認定する。各ノードは、隣接ノード数 M に関して、

$$M > N + \Delta_P$$

が成立した場合、隣接ノードが急増したと判断し剪定要求パケットをブロードキャストする。剪定要求パケットを一定数以上受信したノードはランダム時間待機し、自身以外の隣接ノードが送信停止を行ったかを確認した後に、中継停止状態へ移行する。中継停止状態に移行する際に、中継停止移行パケットをブロードキャストし、隣接ノード内で必要以上に剪定が行われることを防いでいる。

符号化数変更処理、接ぎ木処理および剪定処理の動作フローを図 3 に示す。図 3 において、閾値パラメータ Δ_G 、 Δ_P は、 $\Delta_G < \Delta_P$ を満たしており、 M が

$$N + \Delta_G \leq M \leq N + \Delta_P$$

の範囲内にある場合には、接ぎ木も剪定も行わない。

なお、提案方式では、各ノードは自身の隣接ノード情報と自身が中継ノードもしくは受信ノードであるかのみを管理し、明確なマルチキャスト配信経路情報は把握していない。どのノードも、マルチキャスト配信経路全体を維持・管理する必要はなく、マルチキャスト配信経路の規模・複雑さによる管理コストの増加は生じない。

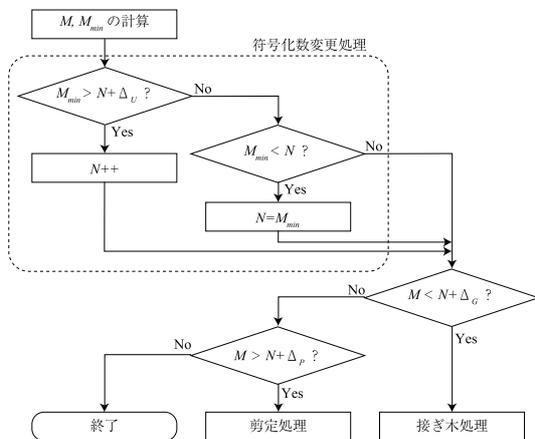


図 3 フローチャート
Fig. 3 Flowchart.

5. シミュレーションによる性能評価

提案方式の有効性を検証するため、ネットワークシミュレータ ns2 [11] を用いて性能評価を行う。シミュレーション時間は 600 秒で 200 回試行した平均を用いた。その他のシミュレーション諸元を表 1 に示す。比較対象として、CodeCast [3] (符号化数 $N = 2$) および、4.2 節の動的符号化数制御を用いずに符号化数 N を 2, 4, 8 に固定した方式 (NC2, NC4, NC8) を用いた。評価指標として、平均配送率・平均遅延・総転送データ量を用いた。ここで、平均配送率とは、各マルチキャスト受信ノードが復号できたパケット数を送信ノードが生成した情報パケット数で割ったものである。また、平均遅延とは送信ノードから送信された各符号化パケットが、受信ノードで復号されるまでの時間の総和を受信ノード数で割った値である。総転送データ量はシミュレーション時間中にネットワーク内で送信された符号化パケットや制御パケットの総量である。

図 4 はノードの移動速度に対する平均配送率を示している。図 4 において、移動速度にかかわらず提案方式が最も高い配送率を実現している。提案方式では、周囲のノードの最低隣接ノード数に合わせて符号化数を変更するため、他の方式と比べ符号化数分のパケットを収集できず復号に失敗するノードが減少するためである。符号化数を固定した NC4, NC8 においては、静止時よりも移動速度が 1 [m/Sec] のときに配送率が増加している。これは、NC4, NC8 では復号するためにそれぞれ 4, 8 個のパケットが必要であり、ノード移動によってこれらの符号化パケットの受信機会が増加したためである。しかし、移動速度が増加すると、ノード移動によって隣接ノード数が符号化数に満たないノードが発生し、復号ができず配送率が低下する。

表 1 シミュレーション主要諸元

Table 1 Simulation parameters.

フィールドサイズ	500 × 500 [m × m]
ノード数	40
マルチキャスト送信ノード数	1
マルチキャスト受信ノード数	10
ノード配置	ランダム
通信半径	100 [m]
電波感知半径	125 [m]
ノード移動モデル	Random Way Point
ノード移動速度	0~4 [m/sec]
データ送信間隔	10 [packets/sec]
情報パケットサイズ	512 [bytes]
Δ_U	3
Δ_G	1
Δ_P	5
M, M_{min} 計算間隔	2 [sec]
N_{unrecv}	1
ガロア体 $GF(2^m)$	$m = 8$

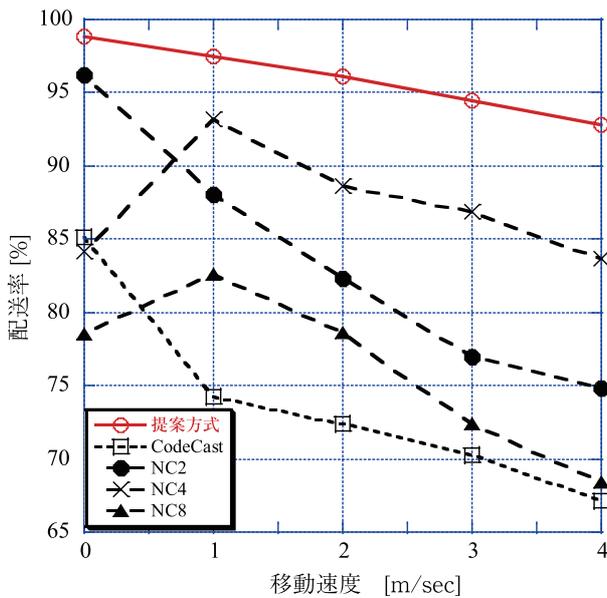


図 4 平均配送率

Fig. 4 Average delivery rate vs. node moving velocity.

NC2 の場合は、復号のための最低隣接ノード数は 2 と小さいが、符号化によるパケット削減が十分に行われないためパケット衝突によるパケットロスにより配送率が低下する。また、移動速度が増加するとパケットの再送が増え、パケット衝突が助長されるため、移動速度の増加にともなって配送率も低下する。CodeCast の配送率は最も低い。CodeCast では、再送抑制制御がないため、再送要求を受け取ったすべてのノードが再送を行うため、再送トラヒックの影響が非常に大きい。さらに、冗長な中継ノードの剪定機能が不十分である点も、冗長トラヒックの増加を引き起こす。これらの理由により、CodeCast ではトラヒック増加によるパケットロスが頻発し、低い配送率となった。

図 5 はノードの移動速度に対する平均遅延を示している。図 5 において、移動速度にかかわらず提案方式の平均遅延が最も小さい。これは、提案方式では符号化数動的制御により、パケット配送率が向上し再送回数が減少したためである。提案方式以外の方式は、提案方式と比べノード移動によって生じるパケット衝突や復号失敗によって再送回数が増加し、遅延が悪化している。遅延の構成要素では、復号可能な個数パケットを収集する時間よりも、再送による時間の方が支配的であり、符号化数による遅延の変化よりも、パケットロスあるいは復号失敗による再送の有無が遅延性能に大きく影響する。図 4 において低い配送率であった CodeCast, NC8 の遅延が、NC2, NC4 と比べ小さくなっている。CodeCast, NC8 では再送失敗も多く、シミュレーション時刻終了時点で受信ノードに正しく到着していないパケットの遅延は無限大となる。しかし、今回の遅延の計算では、これらの未到着パケットを除き、シミュレーション時間内に受信ノードに正しく到着したパケットのみの遅延を算出しているため、見かけ上小さくなっている。

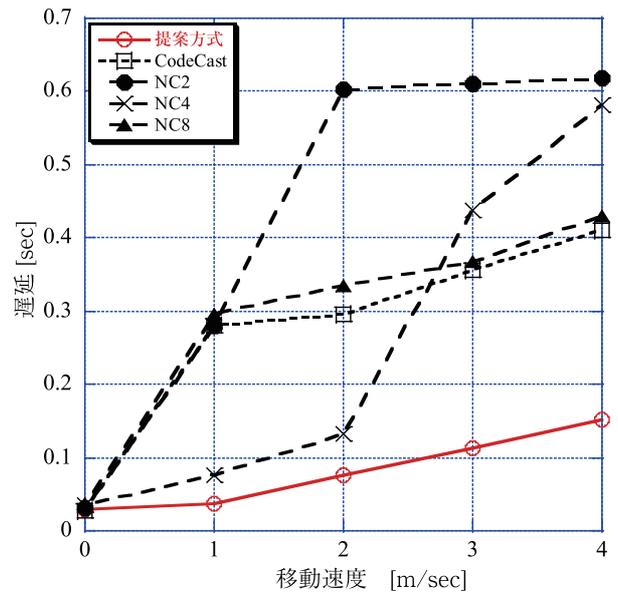


図 5 平均遅延

Fig. 5 Average delay vs. node moving velocity.

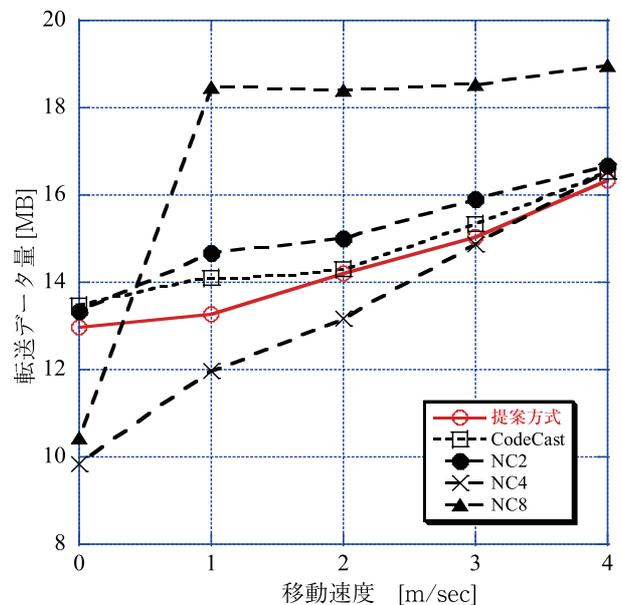


図 6 総転送データ量

Fig. 6 Total amount of data transmitted vs. node moving velocity.

図 6 はノードの移動速度に対する総データ転送量を示している。図 6 において、静止時では NC4, NC8 が提案方式よりも総転送データ量が少なくなっている。これは、NC4, NC8 とともに提案方式より配送率が低く (図 4)、ネットワーク中に転送されるパケットが減少しているためである。提案方式は、高い配送率を実現していることを考慮すると、他の方式と比べ転送データ量を小さく抑えられているといえる。これは、符号化数動的制御によって、各ノードにとって最適な符号化数を選択することで転送されるパケット数の削減とパケットロスの低減を両立しているためである。NC8 は、符号化数が大きく、さらに配送率も低い

にもかかわらず、総データ転送量が最も大きい。これは、隣接ノード不足による中継開始要求パケットと復号失敗時の再送要求パケットが大量に送信されるためである。

6. 実機実験

提案方式の実運用を想定し、Android 端末実機を使用した実機実験を行い、通信性能を測定する。本実験で使用した Android 端末の仕様は表 2 のとおりである。図 7 は、本実験で使用したトポロジを示している。実験スペースの制約上、各端末の物理的距離を離して配置することが困難であったため、MAC アドレスフィルタリングを用いて、図 7 の各 Android 端末の上下左右斜め方向に隣接する端末とのみ通信が可能ないように設定した。実験では、図 7 において破線で囲まれた A1, B2, C3 の 3 端末をマルチキャスト受信ノードとし、端末移動を模擬するため、A1, B2, C3→A2, B3, C1→A3, B1, C2→A1, B2, C3→…のように、3 端末を 1 組として 2 秒間隔でネットワークへの参加、離脱を繰り返した。本実験では、比較対象として NC2 を用いた。なお、本実験では、提案方式、NC2 双方とも配送率は 100% となった。

図 8 は、送信ノードの送信したデータ量に対する、受信ノードの受信パケット（符号化パケット+再送パケット）数を表している。図 8 より、提案方式は、NC2 と比較して、平均受信パケット数が削減できている。これは、提案方式では、隣接ノード数の減少に応じて符号化数 N を 2 から 1 に変更し、符号化失敗を防ぎ再送を低減できているた

表 2 端末仕様

Table 2 Specifications of Android tablet.

製品名/製品型番	Nexus7 (2012)
OS	Android 4.2.2
CPU	NVIDIA Tegra 3 (1.3 GHz)
Memory	1 GB DDR3L
通信モジュール	IEEE802.11b/g/n



図 7 実験トポロジ

Fig. 7 Experiment topology.

めである。一方、NC2 では、隣接ノード数の減少時に、符号化失敗が生じ、その結果再送が行われ受信パケット数が増加した。

図 9 は、送信ノードの送信したデータ量に対する、受信ノードにおいてすべてのデータを受信完了するまでの時間の変化を表している。図 9 より、提案方式は、NC2 と比較して受信完了時間が短縮されており、さらに、送信データ量に対する増加率も小さくなっていることが分かる。送信データ量が増加すると、ネットワーク内のパケット数が増加し、再送遅延が増加する。しかし、提案方式では符号化数動的制御によって再送を低減できているため、NC2 と比較して再送遅延による悪影響が小さい。

本実験では、端末の参加、離脱によりノード移動を模擬

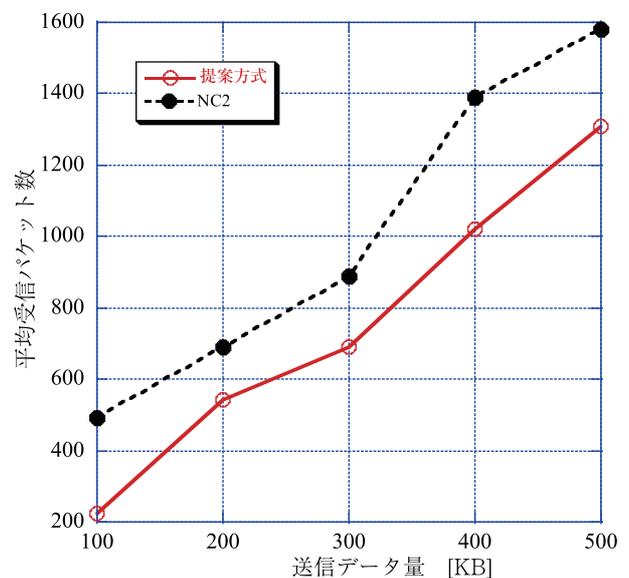


図 8 受信パケット数

Fig. 8 Total number of received packets vs. sending data size.

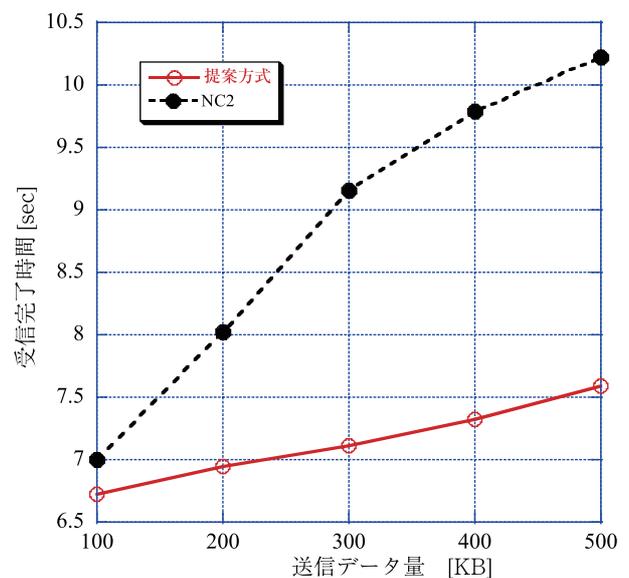


図 9 受信完了時間

Fig. 9 Data reception complete time vs. sending data size.

したため、実際のアドホックネットワークでの運用とは異なる。このため、本実験結果はあくまで参考値となるが、市販 Android 端末を用いてアドホックネットワークを構成し、マルチキャスト通信を行った場合、配送率 100% を実現しながらも、400 KB のデータを 10 秒以下で送信可能であることが確認できた。本実験環境下に限定されるが、提案方式は、実装実験においても NC2 と比較して性能が向上しており、十分実用可能であると考えられる。

7. おわりに

本論文では、アドホックネットワークにおけるマルチキャスト通信に適応型ネットワークコーディングを適用し、ネットワークの変化が激しい環境においても安定したマルチキャスト通信を実現する方式を提案した。提案方式は、各ノードが自律的に周囲の端末の隣接ノード数に応じて動的に符号化数変更を行い、効率的なネットワークコーディングが可能となる。シミュレーション評価を行い、提案方式が既存方式と比較して、配送率、遅延、転送データ量の点で性能が向上することを明らかにした。また、Android 端末を用いた実装実験を行い、提案方式の実環境下での通信性能を明らかにした。実装実験では、ネットワークサイズおよびトポロジが限定されたものであったため、今後多様なネットワーク条件下で実験を行い、実用面での性能を明らかにし、提案方式のシステムパラメータの最適化についても検討する必要がある。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 26289122, 15K00141 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Ahlswide, R., Cai, N., Li, S.-Y. and Yeung, R.: Network Information Flow, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.46, No.4, pp.1204–1216 (2000).
- [2] Ni, S.-Y., Tseng, Y.-C., Chen, Y.-S. and Sheu, J.-P.: The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network, *ACM Mobilcom*, pp.151–162 (Aug. 1999).
- [3] Park, J.-S., Gerla, M., Lun, D.S., Yi, Y. and Medard, M.: CodeCast: A Network-Coding-Based Ad Hoc Multicast Protocol, *IEEE Wireless Communications*, pp.76–81 (Oct. 2006).
- [4] Ho, T., Medard, M., Koetter, R., Karger, D.R., Effros, M., Shi, J. and Leong, B.: A random linear network coding approach to multicast, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.52, No.10, pp.4413–4430 (2006).
- [5] Saravanan, K. and Venkatalakshmi, B.: Mobility based minimal network coding (MBMNC) algorithm for mobile ad-hoc network, *Proc. IEEE International Conference on Recent Trends in Information Technology (ICRTIT)*, pp.290–296 (July 2013).
- [6] Lee, S.-J., Su, W. and Gerla, M.: On-demand multicast routing protocol in multihop wireless mobile networks, *Mobile Networks and Applications*, Vol.7, No.6, pp.441–453 (Dec. 2002).
- [7] Minami, K., Matsuda, T., Takine, T. and Noguchi, T.: Asynchronous Multiple Source Network Coding for

Wireless Broadcasting, *American Institute of Mathematical Sciences (AIMS) Journal, Numerical Algebra, Control and Optimization*, Vol.1, No.4, pp.577–592 (2011).

- [8] Koutsonikolas, D., Hu, Y.C. and Wang, C.-C.: Pacifier: High-throughput, Reliable Multicast Without “Crying Babies” in Wireless Mesh Networks, *IEEE Trans. Networking*, Vol.20, No.5, pp.1375–1388 (2012).
- [9] Li, P., Guo, S., Yu, S. and Vasilakos, A.V.: Reliable Multicast with Pipelined Network Coding Using Opportunistic Feeding and Routing, *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, Vol.25, No.12, pp.3264–3273 (2014).
- [10] Matsuda, T., Noguchi, T. and Takine, T.: Broadcasting with Randomized Network Coding in Dense Wireless Ad Hoc Networks, *IEICE Trans. Communications*, Vol.E91-B, No.10, pp.3216–3225 (2008).
- [11] DARPA, The Network Simulator - ns-2 (online), available from <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (accessed 2016-03-20).



野口 拓 (正会員)

2004 年 3 月大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士課程修了。同年 4 月立命館大学情報理工学部講師、2013 年 4 月より同大学情報理工学部准教授、現在に至る。通信ネットワーク、特にアドホックネットワークの設計およびこれらの性能評価に関する研究に従事。工学博士。IEEE、電子情報通信学会各会員。



林 直秀

2013 年 3 月立命館大学情報理工学部情報コミュニケーション学科卒業。2015 年 3 月同大学大学院情報理工学研究科情報理工学専攻博士課程前期課程修了。アドホックネットワークにおける経路制御、ネットワークコーディングの応用に関する研究に従事。