

## MANETにおけるネットワークコーディング を用いた効率的な符号パケット転送手法

嘉義智紀<sup>†</sup> 高橋修<sup>††</sup>

近年、無線アドホックネットワークの研究が盛んに行われている。アドホックネットワークの問題点としてパケット到達率が悪く信頼性が低いことがあげられる。通常、信頼性を向上させるために ARQ や FEC という手法が用いられる。しかし、無線環境において ARQ は受信確認である ACK が到達せず何度も再送してしまい遅延が大きくなってしまおうという問題点があり、FEC は符号化されて得た冗長なパケット送信しなければならず送信元ノードの送信回数が増えてしまう問題点がある。そこで本論文ではマルチパスルーティングによって複数経路を構築し、送信元ノードはパケットを符号化せずにそれぞれの経路に送信し、中継ノードが符号化を行う Network Coding を用いることでアドホックネットワークのような信頼性の低い環境下において効率的な信頼性向上手法を提案する。さらに本提案手法をシミュレータ上で実装し、評価を行った結果、既存の転送方式に比べパケット転送率が向上し、送信元で符号化を行った場合と比べ、パケットオーバーヘッドが減少することを示す

## Efficient Reliable Data Transmission using Network Coding in MANET Multipath Routing Environment

TOMONORI KAGI<sup>†</sup> OSAMU TAKAHASHI<sup>††</sup>

Recently, the wireless mobile ad hoc network been studied. However, the ad hoc network is low reliability by low ratio of packet delivery. Usually, ARQ and FEC are two methods used to recover the lost packets for low reliability networks. However, ARQ may not be applicable in low reliability and high mobility network such as the ad hoc network because of increase delay caused by retransmissions of sender by unreachable ACK. The source node must send redundant encode packet by using FEC, and the source node increase frequency of transmission. In this paper, We propose an efficient reliability improvement method use multipath routing constructs multiple routes and apply network coding in low reliability network. In our proposal, the source node encodes no packets, and sends only data packets to each route. In addition, our proposal is mounted and evaluated on simulator. Results of simulation experiments show that the proposed method achieves higher ratio of delivery than DSR. In addition to, our proposed method achieves lower packet overhead than existing method that encoded by the source node.

### 1. はじめに

近年、無線通信技術が発達・普及し、さまざまな端末に無線デバイスが搭載されている。これに伴い、アクセスポイントなどの通信インフラを介さずに無線端末のみでネットワークの形成を行うモバイルアドホックネットワークの研究が盛んに行われている。アドホックネットワークでは、通信を行う2つの無線端末が互いの無線到達範囲に存在しない場合、他の無線端末を中継するマルチホップ通信を行うことで通信を可能にしている。アドホックネットワークでは、ノードの移動による経路の切断や無線通信による信頼性の低さ、パケットのコリジョンなどにより送信元から宛先にお

けるパケット到達率が低くネットワークの信頼性が低いという問題点がある。

アドホックネットワークにおいて信頼性向上の手法としてマルチパスルーティングが挙げられる。マルチパスルーティングとは通信経路が切断された時のために、あらかじめ複数経路を構築し、主経路が切断された際に別な経路を用いてパケットを送信する手法である。マルチパスルーティングにおいては、複数経路の Disjoint 性が重要になる。Disjoint 性とは複数経路がそれらの間でどのくらい独立しているのかを示し、Link Disjoint と Node Disjoint の2種類がある。Link Disjoint とは複数経路でリンクを共有しないものであり、Node Disjoint とは複数経路がリンクだけではなく、中継ノードも共有せず、完全に経路が独立したものである。経路が独立していない場合、ある一方の経路が切断された場合に別な経路も同時に切断される可能性が高くなる。さらに、複数経路を同時に用いることを考慮する

\*<sup>†</sup> 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科  
Future University Hakodate  
<sup>††</sup> 公立はこだて未来大学 システム情報科学部  
Future University Hakodate

と Disjoint でない経路が構築された場合、複数経路に共有されているノードに負荷が集中してしまう。Disjoint 性を考慮し独立性の高い経路を構築したマルチパスルーティングの例として SMR[4]があげられる。

別な観点からのネットワークにおける信頼性向上の手法として誤り訂正手法である ARQ(Automatic Repeat Request)と FEC(Forward Error Correction)がある。

ARQ は、受信側が送信側からのパケットを正しく受信できれば受信確認(ACK)を送信し、送信側は ACK がある一定時間の間に届かなければそのパケットを再送するという手法である。ARQ を用いることで正しく受信できなかったパケットを再送により受信することが可能になり信頼性の向上を図れる。しかし、ARQ をアドホックネットワークに適用した場合、パケットが受信側に届いているにもかかわらず、その後経路が切断された場合には ACK が届かないということになり、送信側は何度もパケットを送信してしまい無駄なパケットを送信している上に遅延が大きくなってしまふ恐れがある。

FEC とは、送信側がパケットを符号化することによって冗長ビットを生成し、その符号化された情報を送信したいパケットに付加して送信し、受信側はその符号化された情報から誤りが発生しても訂正することが可能な手法である。FEC をアドホックネットワークに用いたものとして[6][7]が挙げられる。これらの手法はどれもマルチパスルーティングによって複数経路を構築し、FEC により、符号化されたパケットを送信している。データパケットと符号化パケットを別な経路に分けて送信することで負荷分散が図れている。しかし、これらの手法ではマルチパスルーティングと FEC により信頼性の向上を図っているが、送信元ノードによって符号化・送信を行っているため送信元ノードの送信パケット数が増えてしまうという問題点がある。例えば、図1のように Data1, Data2 というパケットから Code という冗長なパケットを符号化により生成し、送信する場合、送信元ノードにおける送信回数は3回になる。このように送信元ノードは冗長なパケットの数だけ送信回数が増えている。送信回数が増えるということはネットワーク全体に流れるパケット数が増えるだけでなく、バッテリーの消耗や、通信を行っているノードの密度が高い場所においては、RTS/CTS によって送信権を得るための遅延などが発生して効率的でない。

そこで、本論文では、マルチパスルーティングによって Node Disjoint な複数経路の構築を行い、送信元ノードでなく、中継ノードが符号化を行う Network Coding を用いることで、送信元ノードはデータパケ

トを1回の送信でそれぞれの経路にパケットを送信することで送信元ノードによる送信回数を減らし、エラーが発生する環境下においても効率的に、パケット転送率の向上を行う手法を提案する。また、計算機シミュレーションにより提案方式の性能評価を行う。

2章に提案手法を述べ、3章に実装、4章に評価と考察を述べる

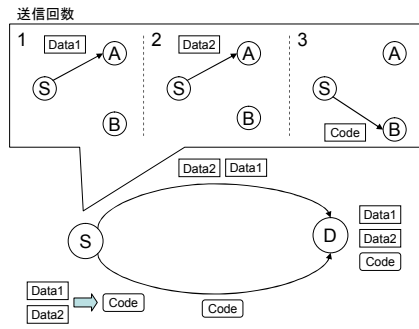


図1 送信元ノードによる符号化

## 2. 提案手法

本提案手法は Node Disjoint な複数の経路を構築し、送信元ノードが1回の送信でそれぞれの経路上に存在する隣接ノードに対しパケットの同時送信を行う。符号化に必要なパケットを受信した隣接ノードはパケットの符号化(Network Coding)を行い、転送する。

符号化を行うノードは、宛先ノードに近いノードが符号化を行った場合、符号化を行うまでに遅延が発生し、効率が悪いため、送信元ノードから近い位置(隣接ノード)とする。

送信元は複数経路上にデータパケットを送信し、中継ノードが符号化を行うことにより、送信元ノードのパケット送信数を増やすことなく冗長な符号化パケットを宛先ノードに送信することが可能になり、エラーが発生する環境化においても効率的に信頼性の向上を図ることが出来る。

### 2.1 基本動作モデル

本提案手法は、Node Disjoint な複数経路が構築されたことを前提としている。

図2に2つの経路を構築した場合の基本動作モデルを示す。

送信元ノード S から宛先ノード D に対して

経路1: (S, A, C, D)

経路2: (S, B, E, F, D)

の2つの経路が構築されている場合を想定する。

本モデルには以下の5種類のノードが存在する。そ

れぞれ以下を行う動作を示す。

- 送信元ノード(ノード S)
  - 通信を開始するノードでデータを隣接ノードに送信する。
- 経路 1 の隣接ノード(ノード A)
  - この経路 2 に存在する隣接ノードはデータパケットを受信したらそのまま転送する
- 経路 2 の隣接ノード(ノード B)
  - この隣接ノードはデータパケットを受信したら符号化に必要なパケットを集める。符号化に必要なパケットを集めたら符号化を行い、パケットを生成し、転送する
- その他の中継ノード(ノード C,E,F)
  - 受信したパケットをそのまま転送する
- 宛先ノード(ノード D)
  - パケットを受信し、パケットロスがあれば符号化パケットから復号を行う

本提案手法では、負荷の分散を図るため、経路 1 ではデータパケットのみの通信が行われ、経路 2 では符号化パケットの通信を行う。

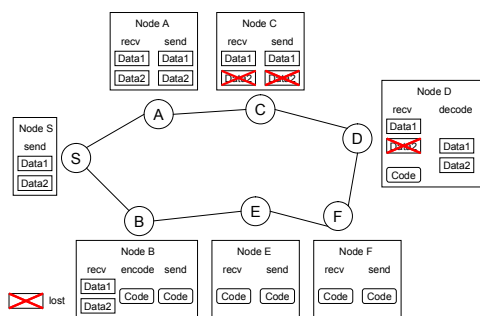


図 2 提案手法の基本動作モデル

通信を開始する送信元ノード S は、データパケットを隣接ノードである A と B に同時送信を行う(2.5 節参照)。次に、Data1 を受信した隣接ノード A は Data1 をそのまま転送する。Data1 を受信した隣接ノード B は転送せずにバッファに格納する。引き続き、送信元ノード S は、Data2 を送信する。同様に、Data2 を受信したノード A は Data2 をそのまま転送する。Data2 を受信したノード B は先にバッファに格納してある Data1 と Data2 から符号化パケットである Code を生成し送信する。その他の中継ノードである C,E,F は転送のみを行う。

ここで、例えば、ノード B-E 間で Data2 のパケットロスが発生したとする。その場合、宛先ノードである

D は Data1, Code を受信しているため、これらのパケットから Data2 を復号することが出来る。

このように送信元ノードは、データパケットである Data1 と Data2 のみを送信し、中継ノードであるノード B が符号化を行うことにより、送信元ノードは図 1 のように符号化されたパケットを送信する必要がなくなり、効率的に符号化パケットを宛先ノード D に送信することが出来る。

## 2.2 複数経路の構築方法

### (1) 経路構築

本提案手法での経路の構築方法について述べる。経路数を多くすることにより、長経路や重複した経路が構築する可能性が高くなるので、本提案方式では 2 本の経路を構築する。

複数経路の構築には SMR の方式を採用する。上野ら[8]によると宛先が一定数の RREQ を受信しその中から経路を選択して RREP を送信するという SMR の経路の構築方法がマルチパスルーティングにおいて最も性能がよいとされている。

### (2) 複数経路の維持

本提案方式は、複数経路を構築している際に有効である。そのため、送信元ノードからの経路に障害が発生した場合には経路の再探索を行い、常に経路を 2 本の経路を維持する。

## 2.3 送信元ノードのデータパケット送信方法

複数経路への同時送信、つまり複数ノードへの同時送信には通常、ブロードキャストを用いる。しかし、ブロードキャストは CDMA/CA による衝突回避を行わないことや、中継ノードが移動してしまい通信できない場合にルートの切断を検知することが出来ず、一旦送信元ノードと隣接ノードの間のリンクが切断されてしまうとその後の通信が成立しなくなってしまう。そこで本提案方式では、プロミスキャストモードによる受信を行う。ネットワークインタフェースカードをプロミスキャストモードに設定することで、自分に到達する全てのパケットを受信することが可能になる。これを用いることによって送信元ノードがユニキャストで送信したパケットを受信することで、ブロードキャストを用いることなく、複数経路(端末)への同時送信を可能とする。

例えば、図 3 に示すように、送信元ノード S はユニキャストによりノード A へ Data1 の送信を行う。その際、ノード B はプロミスキャストモードによってパケットを受信することが出来る。同様にノード B への送信パケットである Data2 をノード B は受信することが出来る。

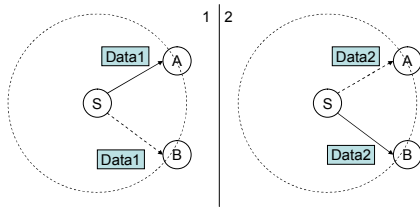


図3 複数経路への同時送信

## 2.4 Network Coding

### (1) 基本方式

ネットワークコーディングとは、A.hlsweide ら[2]によって発表されたネットワーク内部での符号化手法である。通常ルータは転送と複製しか行わないが、符号化も行わせることで効率化を図る。ルータ内での処理を許すアクティブネットワークの応用とも言える。ネットワークコーディングでは、ルータが複数パケットを受信し、それらの複数のパケットは符号化によって変換されて送信される。

本提案方式と同様に、無線ネットワークにネットワークコーディングを適用し、双方向トラフィックが発生した際にその中継ノードがパケットの符号化を行い、符号化パケットをブロードキャストすることによって中継端末による送信回数を削減するものとして[5]が提案されている。

### (2) コーディング方法

本提案手法では、線形ネットワークコーディング[3]を用いる。線形ネットワークコーディングは入力パケット  $M = (M1, M2, \dots, MN)$  として、符号ベクトル  $g_i = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{iN})$  が与えられたとき、以下の式から出力パケットへの変換を行う。

$$P_i = \sum_{j=1}^N g_{ij} M_j \quad (1)$$

さて先ノードは受信したパケットより、符号行列  $G = (g1, g2, \dots, gN)$  と  $P = (P1, P2, \dots, PN)$  がわかっているため、符号行列  $G$  に逆行列が存在する場合に復号可能となる。

## 2.5 Node Disjoint 経路が構築できない場合の処理

一般に、必ず Node Disjoint な複数経路が構築できるとは限らない。

Node Disjoint な複数経路が構築されなかった場合、符号化処理を行わず、SMR と同様に一方の経路のみでのデータパケットの転送を行う。同様に1つの経路しか構築できなかった場合にも符号化を行わずそのまま転送する。

## 3. 実装

本提案方式は既存の reactive 型ルーティングプロトコルで代表的であり、Disjoint な複数経路を構築が比較的容易である DSR[1]を拡張することにより実装する。

### 3.1 ヘッダの拡張

DSR では経路を構築しデータを送信する際に Source Route Option ヘッダを付加する。Source Route Option には送信する経路情報が含まれている。

本提案方式では、1つのパケットで複数経路上の隣接ノードに送るため、Source Route Option ヘッダに複数の経路情報を含まなければならない。さらに符号化に用いるための制御メッセージも含める。送信元ノードは、図4に示すように拡張された Source Route Option ヘッダを付加する(拡張は網掛け部分)。以下の情報を受信した隣接ノードは自分が含まれていない経路情報はヘッダから取り除いて次のノードへの転送を行う。

符号化を行うノードは符号化パケットに、拡張された Source Route Option ヘッダ(図5)を付加し送信する。

Opt Type	Opt Data Len	Reserved	Segs Left
Coding Sequence No		Path1 Len	Path n Len
Path1 Address[1]			
Path1 Address[2]			
...			
Path1 Address[n]			
Path2 Address[1]			
Path2 Address[2]			
...			
Path2 Address[n]			
...			
Path n Address[n]			

図4 Source Route Option ヘッダの拡張(網掛け)

Opt Type	Opt Data Len	Coding Len	Segs Left
Coding Sequence No[1]		Coding Sequence No[2]	
...		Coding Sequence No[n]	
Coding Vector[1]	Coding Vector[2]	...	Coding Vector[n]
Path1 Address[1]			
Path1 Address[2]			
...			
Path1 Address[n]			

図5 拡張 Source Route Option ヘッダ(符号化)

符号化に用いるための制御情報として Coding Sequence No, Coding Vector がある。以下にそれぞれの機能について説明する。

・ Coding Sequence No

送信元ノードがパケット1つ1つに生成し、割り当てる順序番号である。中継ノードは、符号化に用いるパケットの Coding Sequence No をパケットに付加しておく。例えば、2つのパケットから符号化を行う場合、それぞれの Coding Sequence No をヘッダに格納しておくことでデータパケットと符号化パケットとの関連を宛先ノードは判断することが出来る。

・ Coding Vector

コーディングを行う際の符号ベクトルである。中継ノードによって符号ベクトルは割り当てられる。この符号ベクトルを用いて符号化パケットの生成を行い、復号する際に用いる。

4. 評価

本提案プロトコルを計算機シミュレーションにより評価する。シミュレータには ns-2 を用いる。

4.1 評価内容

(1) 評価モデル

以下の評価モデルとの比較により評価を行う。

モデル1: SMR

図6で示すように、マルチパスルーティングによって複数経路を構築し、1つの経路で交互にデータパケットをそのまま転送する。

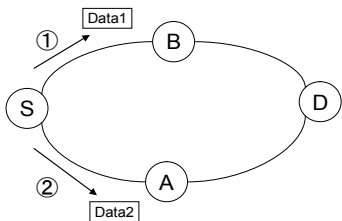


図6 転送方式(SMR)

モデル2: FEC

図7で示すように、送信元ノードによって符号化を行い、符号化パケットをデータパケットとは別な経路により転送する。符号化方法については提案手法と同じ方法を用いる。

比較のため、提案方式同様 Node Disjoint な経路が構築されなかった場合には符号化パケットの転送は行わない。

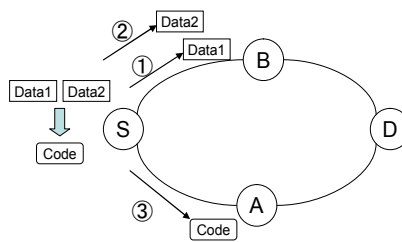


図7 転送方式(FEC)

モデル3: 提案手法 NC (Network Coding)

図8に示すように、中継ノードにより符号化を行う。

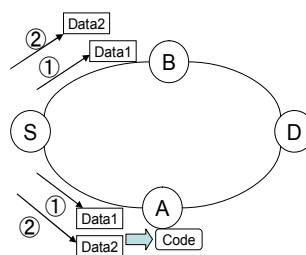


図8 転送方式(NC)

(2) 評価項目

パケットのロストを発生させた環境下において、パケット到達率とパケットオーバーヘッド、遅延についての評価を行う。

・パケット到達率

送信元ノードで生成したデータパケット数のうち宛先ノードDが受信したパケット数の割合と定義する。

・パケットオーバーヘッド

データパケット、制御パケットを含む全ノードが送信したパケット数と定義する。

・遅延

送信元でパケットが生成され、そのパケットが宛先ノードに届くまでの時間と定義する。符号化パケットを送信する手法については、復号が可能な場合においては、復号されるまでの時間とする。

4.2 シミュレーション環境

表1にシミュレーション環境の詳細を示す。

符号化については、2つのデータパケットから2.6節で述べた符号化方式により、1つの符号化パケットを生成する。

今回の評価で、Packet Loss Rateを用いる。Packet Loss Rateとは、ノード間のリンクでパケットをロストする確率であり、ランダムに発生させる。無線で起こりう

様々なパケットロストの要因を ns-2 で再現するのが困難であるため、故意にパケットをロストすることにより不安定な状況下でのシミュレーションを実現する。

表1 シミュレーション環境

フィールド	1000 × 1000 [m]
ノード数	100
無線到達範囲	250 [m]
コネクション数	1
移動速度	5 [km/h]
移動モデル	Random way point
通信時間	500 [sec]
データサイズ	512 bytes
プロトコル	UDP
パケット生成間隔	0.05 [s]
Packet Loss Rate	0 ~ 50 [%]

### 4.3 シミュレーション結果と考察

Packet Loss Rate に対するパケット到着率, 通信遅延, パケットオーバーヘッドのシミュレーション結果を図 9, 10, 12 に示す。

図 9 に Packet Loss Rate に対するパケット到着率を示す。Packet Loss Rate が高くなるにつれ、パケット到着率が低下している。しかし、符号化を行い冗長なパケットを送信している提案手法 (NC) と FEC に関してはある程度の Packet Error に対してはパケット到着率が高い。送信元ノードで符号化を行った場合と中継ノードで符号化を行った場合を比較しても同等のパケット到着率を達成している。

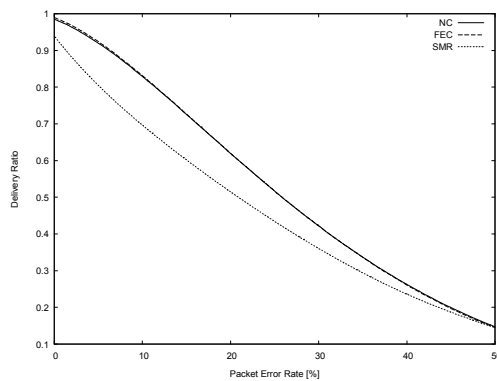


図 9 パケット到着率

図 10 に Packet Loss Rate に対するパケットオーバー

ヘッドを示す。全体的に Packet Loss Rate が高くなるにつれて減少しているが、Packet Loss Rate が高くなると受信できるパケットが減り転送するパケット数が減っているためである。1 つの経路で転送を行っている SMR に比べ、NC と FEC では、両方の経路を同時に用いて冗長なパケットを送信しているためにオーバーヘッドが大きい。

本提案方式 (NC) では、中継ノードが符号化を行っているため送信元ノードが送信するパケット数を抑えることが出来ている。ネットワーク全体としてのオーバーヘッドを減らしている。

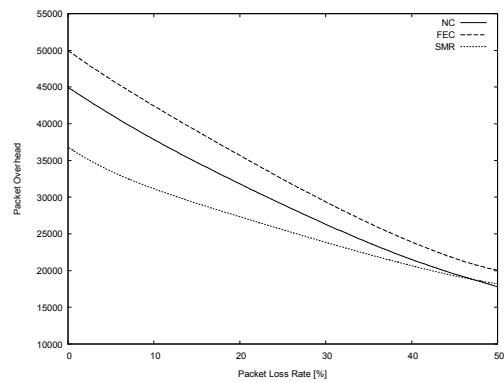


図 10 パケットオーバーヘッド

図 11 に示すように、FEC は送信元で符号化パケットを生成して送信しているため送信パケット数が増加している。今回のシミュレーションでは、2 つのパケットから 1 つの符号化パケットを生成しているため FEC の送信パケット数が SMR と比較して約 1.5 倍になっている。

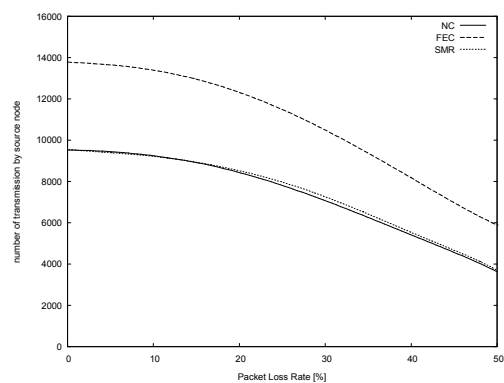


図 11 送信元ノードによるパケット送信数

図 12 に Packet Loss Rate に対する遅延を示す。Packet Loss Rate が高くなると経路の構築に用いるパケットである RREQ と RERP をロスする確率が高くなり、経路が構築されるまでに時間がかかってしまい遅延が大きくなる。

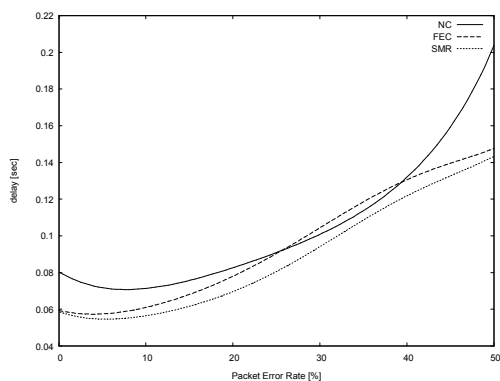


図 12 遅延

符号化パケットを送信する手法では、データパケットの転送に失敗しても、別な経路から送られてくる符号化パケットを受信することによって復号可能になる。そのため、図 13 で示すように、遅延が大きくなっている。

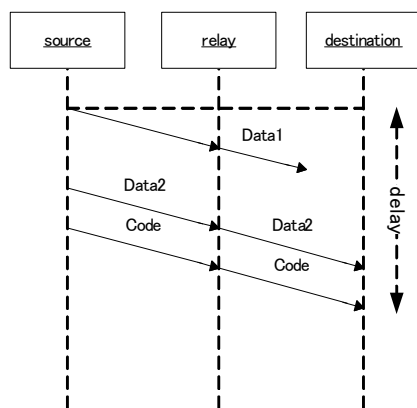


図 13 符号化（送信元）による遅延例

FEC と提案手法(NC)を比較すると、本提案方式のほうが、遅延が若干だが大きい。これは以下の理由にある。例えば、図 14 に示すように Data1 を送信元ノードが送信し中継ノードが受信したとする。中継ノードは、このパケットをバッファに格納しておき、2 つ目のパケットを受信した段階で符号化パケットを送信する。

中継ノードは、Data2 の受信には失敗したとすると、Data3 を受信した時点で、Data1 と Data3 から符号化を行い、Code を生成し送信する。宛先ノードがこれを受信して Data1 を復号できるため、遅延が大きくなってしまうことになる。

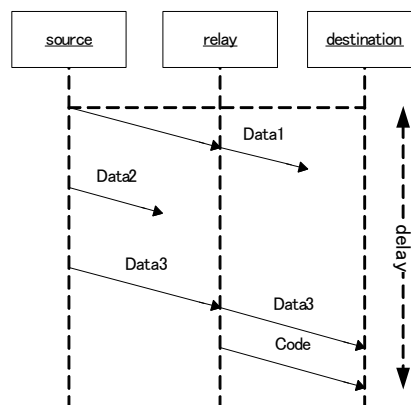


図 14 符号化（中継ノード）による遅延例

## 5. おわりに

本論文では、中継ノードが符号化を行う Network Coding をアドホックネットワークに用いることによって、送信元ノードは、冗長な符号化パケットを送信することなく信頼性の向上を行える手法を提案した。シミュレーション評価の結果、パケットエラーが発生する環境下において、本提案方式は送信元ノードが符号化を行い送信する従来の手法と比較して多少の遅延の増加が生じるが、同等のパケット到達率を示し、さらに送信元ノードの送信パケット数を削減することによりオーバーヘッドを減らし、本提案手法が従来の送信元による符号化方式よりも効率的に信頼性の向上が行えることを示した。

今後の課題として、Node Disjoint でない経路が構築された場合についての転送・符号化方式について検討する。

## 参考文献

- [1] D.Jhonson, Y.Hu, and D.Maltz, "The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4", IETF-Request-for-Comments, rfc4728.txt, February 2007
- [2] R. Ahlswede, N. Cai, S. R. Li, and R. W. Yeung. "Network information flow", *IEEE Transactions on Information Theory*, July 2000
- [3] S.-Y. R. Li, R. W. Yeung, and N. Cai. "Linear network

coding”, *IEEE Trans. Information. Theory*, 49:371–381, Feb. 2003.

[4] S. J. Lee, and M. Gerla “Split Multipath Routing with Maximally Disjoint Paths in Ad hoc Networks”, pp. 3201-3205 June ICC 2001

[5] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Medard, and J. Crowcroft, “XORs in the air: Practical wireless network coding,” Proc. of ACM SIGCOMM 2006, pp.243-254, Pisa, Italy, Sept. 2006.

[6] W. Lou, W. Liu, Y. Zhang, “Performance Optimization using Multipath Routing in Mobile Ad Hoc and Wireless Sensor Networks”, *Combinatorial Optimization in Communication Networks*, edited by M. Cheng, Y. Li, and D-Z. Du, Kluwer, 2006.

[7] R. Ma, J. Ilow, “Regenerating Nodes for Real-Time Transmissions in Multi-Hop Wireless Networks,” In IEEE LCN’04, 2004.

[8] 上野裕介 “ルートの独立性を考慮したマルチパスルーチングプロトコルの提案とその評価”, 情報処理学会論文誌, Vol.425, No.12, Dec. 2004