

## 適応型ネットワークコーディングを用いた アドホックマルチキャストネットワーク

星野 豊† 野口 拓† 川合 誠†

† 立命館大学大学院 理工学研究科

### 1 はじめに

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 [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を提案する。NC とは、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出来るが、冗長なトラフィックがネットワーク全体に氾濫し、ネットワーク負荷が増大する問題がある。その様な環境で NC を使用することで、冗長なトラフィックが削減できネットワーク負荷を抑えることが出来る。しかし、NC では転送の過程でパケット数が減少するため、送信ノードからのホップ数やパケットロスが配送率や遅延に大きく影響する。また、端末の移動によるネットワークの局所的な密度の変化に対応するために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必要がある。本研究では、これらの問題に対して動的な符号化数制御および、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プロトコルを提案する。

### 2 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符号化に関する技術である。NC を用いることでネットワークの最大フローで各受信ノードヘデータを送信することが可能である。NC では、図 1 に示すように、複数の経路から受信したパケットに対して演算 (符号化) を行うことで、単一パケットを生成し転送を行うことによって冗長なパケットの転送を削減することが出来る。

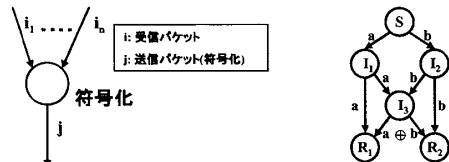


図 1: ネットワークコーディング 図 2: 符号化の例

図 2 に演算に排他的論理和を用いた符号化の動作を示す。送信ノード S が、2 つのパケット a, b をマルチキャストする場合を考える。NC を適用しない環境では、中間ノード I<sub>3</sub> は a, b それぞれのパケットを転送するため、転送処理が 2 回発生することになるが、NC を用いることで、中間ノード I<sub>3</sub> はパケット  $c = a \oplus b$  を生成し転送出来るため、転送処理が 1 回で済む。パケット c を受信したマルチキャストメンバノード R<sub>1</sub> と R<sub>2</sub> は、I<sub>1</sub> と I<sub>2</sub> から受信しているパケット a, b より、パケット c との排他的論理和を計算することによって a, b 2 つのパケットを取り出すことが可能である。

本論文では、NC の演算方式として線形演算を使用した、線形 NC [2][3] を用いた。線形 NC では、受信したパケットに対し線形演算を行う。受信したパケット数が N 個とすると、各ノードに対して N 個の符号化ベクトルを割り当てる必要がある。

また、本研究では符号化パケットを有限体上からランダムに選択して符号化を行うため、トポロジの変化に応じて符号化ベクトルの割り当てを考慮しなくてもよいプロトコルである、ランダムネットワークコーディング [4] を用いた。

### 3 適応型ネットワークコーディング

本研究は、アドホックマルチキャストネットワークにランダム NC を適用することによって、冗長なトラフィックを削減した効率の良いマルチキャストを実現することを目的としている。

しかし、復号するためには符号化時に使用したパケット数 (符号化数) 以上の符号化パケットを受信する必要があり、パケットロスが起こった場合には、不足した符号化パケットを再送によって取得する必要がある。

そこで本研究では、図 3 に示すように各端末が周囲の状況に応じて動的に符号化数を変更することによって、ネットワーク状況の変化に対応するマルチキャストネットワークを提案する。提案方式では、符号化に使用するパケット数をノード密度に応じて変化させ、ノード密度の薄い箇所では符号化数を減少し、ノード密度の濃い箇所では符号化数を増加させることで復号失敗・パケットの衝突によるパケットロスの制御をしている。図 3 ではノード密度が濃い左半分領域では、符号化数 2、ノード密度の薄い右半分領域では符号化数 1 (flooding) で転送を行っている。ノード a は 2 つのパケットを符号化し転送する。ノード b では復号のみ行い転送をする。この様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ノード密度が最も小さいエリア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に符号化数制御が行えるようになる。

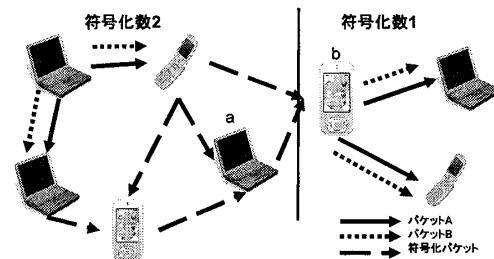


図 3: 適応型ネットワークコーディング

本提案方式における各処理の内容を次に述べる。

#### 3.1 送信処理

N を送信・転送時の符号化数とすると、送信ノードでは、N 個のアプリケーションブロックがネットワーク層に渡されるまで、それらのブロックをバッファに格納しておく。N 個のブロックが集まった時点で符号化処理を行い、隣接ノードへ送信する。

送信ノードでの符号化は式 (1) で表すことが出来る。

$$c(\text{blockid}, N) = \sum_{k=1}^N e_k P(k-1 + \text{blockid}) \quad (1)$$

$$e = [e_1 \dots e_N]$$

ここで、P をアプリケーションブロックとし、 $e_k$  を符号化ベクトル、blockid を各符号化パケットに付与されるオフセットとする。

また、e は符号パケットのヘッダに格納される符号化ベクトルを、c は符号化パケットを表し、符号化に使用したア

Ad-Hoc Multicast Network Using Adaptive Network Coding

† Yutaka Hoshino

† Taku Noguchi

† Makoto Kawai

Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University (†)

アプリケーションブロックの識別子と符号化数をヘッダに格納し復号に使用する。

### 3.2 符号化数変更処理

各メンバーノードは隣接ノード (規定時間以上パケットを自身へ転送し続けているノード) からのノード数情報を使用し、ネットワーク密度を計測する。設定された閾値以上の隣接ノード数の変化が起こった場合に符号化数を増減させる。ノード密度が濃い箇所では符号化数を増加させ、転送されるパケットを減少させることでパケットの衝突を起りにくくする。密度が薄い箇所では符号化数を減少させ、復号に必要な符号化パケット数が少なくなるように制御を行う。

### 3.3 中継処理

符号化パケットを受信したノードは、符号化数以上の線形独立な符号パケットが揃うまで受信パケットをバッファに格納する。バッファ内のパケットと線形従属な符号パケットを受信した場合は、その符号パケットを破棄する。符号化数の異なるパケットを受信した場合、既に受信した符号化パケットの符号化ベクトルと受信した符号化パケットの符号化ベクトルの差を 0 ベクトルで埋めることで、復号を行うことができる。

### 3.4 参加処理・剪定処理

各ノードは、自身の隣接ノード数が下限閾値以下になった場合、転送開始パケットをブロードキャストし、周囲のノードで転送を行っていないノードをマルチキャスト転送に参加させる。一方、隣接ノードが上限閾値以上になった場合、剪定要求パケットをブロードキャストし、隣接ノードの一部のマルチキャスト転送を停止させる。

### 3.5 再送処理

各ノードは、符号化数以上のパケットが受信出来なかった場合、復号出来なかったパケットのシーケンス番号を含んだ再送要求パケットをブロードキャストする。パケットを受信したノードは自ノードが、再送要求中のシーケンス番号と同じパケットを復号出来ていた場合、そのデータをブロードキャストする。ブロードキャストで復号済みデータを送信することで、再送要求を送信したノード以外のノードで復号失敗が起こったとしてもパケットロスの回復が可能になる。

## 4 計算機シミュレーションによる性能評価

JiST/SWANS[5] を使用してシミュレーションを行った。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。その他シミュレーション諸元を表 1 に示す。比較対象として符号化数を 2,4,8 (NC2, NC4, NC8) に固定した方式を使用した。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、平均配送率は各マルチキャストメンバーノード (以下、メンバーノード) が受信したデータパケット数の平均 (平均受信データパケット数/送信データパケット数)、平均遅延は各データパケットが送信ノードから送信され、メンバーノードが受信するまでの時間の平均であり、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データパケットや制御パケットの総量である。遅延は、符号化・復号にかかる時間よりも、再送により発生する遅延が大きく影響する。これは、再送制御により制御パケットの送受信が発生してしまうためである。

図 4 と 5 に移動速度の変化による平均配送率・遅延、表 2 に総転送データ量を示す。図 4 より、提案方式 (Adaptive NC) は他の方式と比較して、移動速度が速くパケットの衝突が発生しやすい環境においても配送率の低下が抑えられている。これは、動的な符号化制御によって符号化パケット不足による復号失敗確率が低下したためである。また、図 5 より、提案方式は移動速度によらず、他の方式と比較して遅延を軽減出来ている。ここで、NC2 の遅延が他の方式より大きくなっているのは、パケットの衝突などによるパケットロスで、再送回数が増加したためである。表 2 と図 4 より、提案方式は動的符号化制御を行っており、他の方式と比較して配送率が高いが、総転送データ量の変化は少ない。

これは、自律的な符号化数制御により、符号化数の変更により制御用パケットを必要としないためである。また、NC8 の転送データ量が移動により急激に増加しているのは復号失敗により再送が頻繁に発生したためである。また、NC4 の転送データ量が少ないのは、再送要求がパケットの衝突によるパケットロスで正常に動作しなかったため、パケットの送信数が減少したためである。以上のことから、提案方式は他の方式と比較して、移動速度に関わらず配送率の低下と遅延を抑えられている。

表 1: シミュレーション主要諸元

ノード数	41
メンバー数	10
フィールド	300m × 300m
無線到達半径	100m
移動速度	{0,1,2,3}m/Sec (Random Waypoint)
無線プロトコル	IEEE802.11b
送信レート	10 packets/sec
パケットサイズ	512 bytes
符号化数	2,4,8 (Adaptive は 2,4,8 で変化)

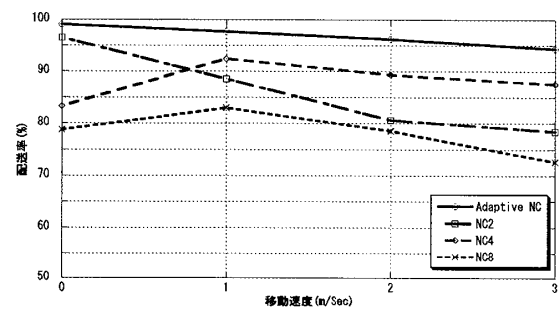


図 4: 平均配送率

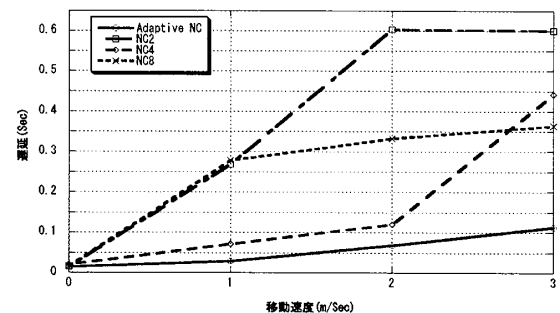


図 5: 平均遅延

表 2: 総転送データ量 (Mbyte)

移動速度 [m/Sec]	0	1	2	3
Adaptive NC	12.982	13.276	14.204	15.025
NC2	13.345	14.681	14.342	14.858
NC4	9.85	11.959	13.184	14.868
NC8	10.430	18.484	18.409	18.383

## 5 まとめ

本稿では、動的符号化制御を行う NC を用いたアドホックマルチキャストプロトコルを提案し、性能評価の結果、提案方式が符号化数を固定させた従来方式と比較し、トラフィックを増加させることなく、配送率の改善と遅延を抑えることが可能であることを確認した。

### 参考文献

- [1] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. Yeung, "Network Information Flow," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 46, No. 4, pp. 1204-1216, Jul. 2000.
- [2] S.-Y. Li, R. W. Yeung, and N. Cai, "Linear Network Coding," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 29, No. 2, pp. 371-381, Feb. 2003.
- [3] S.-Y. Li, N. Cai, and R. W. Yeung, "On theory of linear network coding," International Symposium on Information Theory, pp 273-277, Sep. 2005.
- [4] T. Ho, M. Médard, D. R. Koetter, M. Effros, J. Shi, and B. Leong, "A Random Linear Network Coding Approach to Multicast," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 52, No. 10, pp. 4413-4430, Oct. 2006.
- [5] JiST/SWANS, <http://jist.ece.cornell.edu/>.