

符号理論と通信を融合した Network Coding を用いた アドホックネットワークの実現

寺島美昭 河東晴子 (三菱電機(株)情報技術総合研究所)

■ 符号理論を利用する新たな通信方式への期待

Network Coding は、2000年に R. Ahlswede らが発表した論文¹⁾にて提唱された Max-flow、つまり1つのネットワークにおいて通信可能な最大情報量を計算する数学的な理論が基本である。送信端末と受信端末の間を1対Nの配信型通信を行う場合に、効率よくネットワークを利用できる。従来の一般的なルーティングは、各端末が1つの端末から入力した情報を次の1つの端末へ出力する、リンクを木型の構成で利用する方法である。これに対して Network Coding を利用すると、複数の端末からの入力を、まとめて符号化して次の複数の端末へ出力する、網型のリンク構成(リンク集合)を用いて情報伝送(NC 情報伝送)を行う。一般に1つの端末に伝送情報が集中するとリンクの能力を超える通信が発生し、性能のボトルネックとなる問題がある。Network Coding は、ルーティングの過程で各端末が符号化を施すことにより、この問題を解決する。

この符号化と網型のルーティング(符号化ルーティング)方法には、アドホックネットワーク実現に向けた2つの期待がある。第1は無線通信におけるリンクの有効活用である。従来のアドホックネットワークは、端末間をケーブルが結ぶ有線ルートを組み合わせた木型のルーティングを用いて情報伝送を行う。しかし、安定した情報伝送を実現するためには、無線の狭帯域性や帯域変動性が問題となる。Network Coding は、無線通信が電波伝搬の同報性によりリンクの選択枝が多いことを利用して、これらのリンクを有効活用して問題を解決する。

第2はNC 情報伝送が実現する新たな効果である。NC 情報伝送は、Max-flow による通信性能向上が基本的な効果である。これに加えて文献²⁾では、情報漏洩の危険回避や、情報欠落への耐性の工夫など、符号化ルーティングが生み出す新たな効果を述べている。

しかし、実際にNC 情報伝送をアドホックネットワーク上で実現するには、いくつか課題を解決しなければ

ならない。Network Coding は数学的な理論であるため、現実のネットワークにおける伝送情報の遅延が考慮されていない。また、符号化ルーティングはネットワーク制御が複雑であるため、伝送情報の欠落も発生しやすい。Network Coding の理論通りにNC 情報伝送の効果を得るためには、これらの問題を解決する必要がある。

我々は被災地での救援活動に利用するセンサアドホックネットワークに対して、NC 情報伝送の適用を研究している。被災地では、温度や地形のズレ等を継続的に観測するためにセンサを配置する。これらのセンサは、自律的に構成される利便性の高いアドホックネットワークを介して定周期で観測情報を交換することにより、高精度の観測や迅速な広域状況の把握が実現できる。しかし、被災地では、山岳地形や倒壊物が電波伝搬を遮断するため、十分な通信性能による観測情報の共有が難しい。この問題を解決するために、NC 情報伝送を実現するセンサアドホックネットワーク方式(NC アドホック方式)を設計し、シミュレーションにより基本動作と性能を確認した。

■ Network Coding

◎ 概要

文献³⁾は、リンクに誤りのない場合を前提とする Network Coding のグラフ理論に基づく数学的な考えを解説している。ここでは、ネットワークをグラフ $G=(V, E)$ により表現し、 G を巡回路のない有向グラフと仮定する。 V はノード(頂点)、 E はリンク(辺)の集合であり、 E の要素であるリンク e は、ある情報を誤りなく伝送する能力である容量 $c(e)$ を持つ。リンク e のフロー $f(e)$ はその容量 $c(e)$ を超えることはできない(1)。また送信ノード S と受信ノード集合 T を除く各中継ノードで、流入フローの和と流出するフローの和が等しい(2)。ただし $out(v)$ は頂点 v を始点とする辺の集合、 $in(v)$ は頂点 v を終点とする辺の集合である。

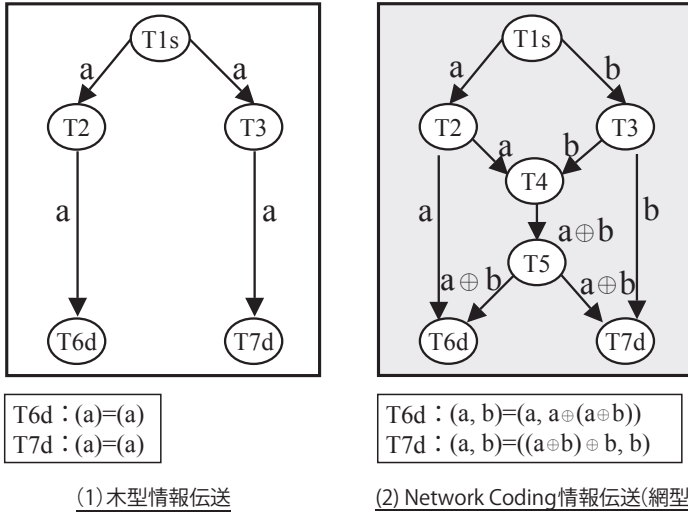


図-1 Network Coding 概要

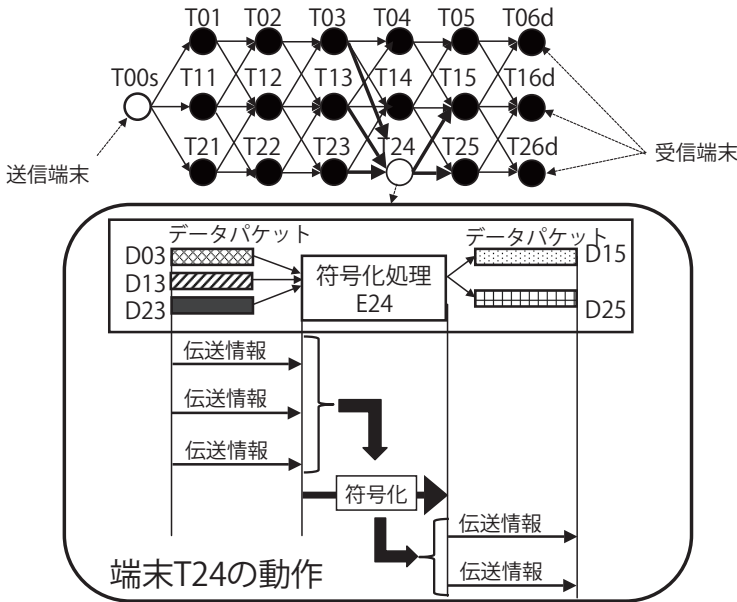


図-2 符号化ルーティング動作

する場合、各端末が1つ以上の受信情報を揃えて符号化し、この結果を次の複数の端末に伝送する動作となる。これを端末間で繰り返すことにより、ネットワーク全体で利用可能なリンクを最大限に活用したNC情報伝送による配信型の通信が実現できる。

NC情報伝送例の動作を、図-1を用いて説明する。図-1(1)は木型の情報伝送、(2)はButterfly Networkと呼ばれる代表的なNC情報伝送の構成である。(1)(2)いずれの場合も端末T1sからT6dとT7dに対して情報伝送を行う。ここで各リンクが通信可能な情報は1であり、それぞれのリンクは相互に独立であるとする。(1)がT1sから端末T6d、T7dに対して木型のルートを用いて1つの情報(a)を送信することに対して、(2)では7つの端末が符号化と冗長的なリンクを活用して2つの情報(a, b)を伝送できる。この例では各端末は、符号化として排他的論理和を用いている。

図-2は、NC情報伝送を行う中継端末の動作である。送信端末T00sが、受信端末T06d, T16d, T26dに対して、端末T01～T05, T11～T15, T21～T25が構成するリンク集合を用いて、1対3のNC情報伝送を行う。たとえば端末T24は、端末T03, T13, T23との間で設定される3つのリンクを介して、D03, D13, D23のデータパケットを伝送情報として受信する。端末T24は、符号化関数E24を用いて符号化を行い、計算された伝送情報D15, D25を、出力側の端末T15, T25へ送信する。

しかし、Network Codingは、この動作が適用できるアプリケーションの種類や、実現のために必要な制御が何かまでは踏み込んでいない。

●研究動向

Network Coding研究は、数学的な理論研究が主流である。複雑なリンク集合を用いて受信端末が確実に伝送情報を復元するために、中継端末が行う符号化や、秘匿性、伝送遅延への耐性を実現する理論が研究されている。

文献4)は、線形Network Codingを提案している。これは入力リンク数と出力リンク数に対応して、入力xに(3)に示す行列式Cを適用することにより、結果となるpを得る線形符号化関数を用いた方法である。また、文

$$0 \leq f(e) \leq c(e) \text{ for } \forall e \in E \quad \dots (1)$$

$$\sum_{e \in \text{out}(v)} f(e) - \sum_{e \in \text{in}(v)} f(e) = 0 \quad v \in V \quad \dots (2)$$

1つの送信ノードSから、受信ノード集合Tのすべてのノード $t \in T$ のそれぞれに、容量rのフローが存在するとする。このとき、Network Codingを用いれば、送信ノードSからすべての受信ノード集合 $t \in T$ に、同時に容量rの配信型通信を行えることが、R. Ahlswedeらが示したNetwork Codingの基本的な定理である。

このグラフ理論の考えを実際のネットワーク上で実現

献 5) は、トポロジに依存することなく、各端末が独立に符号化関数を決定する Random Network Coding を提案している。この方法は制御を簡潔にできることから近年、急速に研究の主流となりつつある。

$$p = C_x = \begin{pmatrix} \tilde{c}_1 \\ \tilde{c}_2 \\ \vdots \\ \tilde{c}_N \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} \tilde{c}_{1,1} & \tilde{c}_{1,2} & \cdots & \tilde{c}_{1,N} \\ \tilde{c}_{2,1} & \tilde{c}_{2,2} & \cdots & \tilde{c}_{2,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{c}_{N,1} & \tilde{c}_{N,2} & \cdots & \tilde{c}_{N,N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix} \cdots (3)$$

一方、現実のネットワークへの適用方法や実用化の研究も活発化している。ここでは配信型の通信を用いて大量のデータを送信するマルチキャスト通信や、ファイル転送通信を実現する研究が報告されている。

■ 実用化

● Network Coding の効果

Network Coding が、実際のネットワークにもたらす効果は、Max-flow による通信性能の向上が基本である。これに加えて、セキュリティの向上がある。たとえば Network Coding が行う符号化には、暗号化と同様の効果が期待できる。さらに情報を複数のリンクに分割送信するため、中継端末が常に部分的な伝送情報を取り扱うように制御できる。中継端末から伝送情報の復元が困難であることから、アドホックネットワークにおける情報漏洩防止の効果がある。このように符号化とルーティングを組み合わせる新たな考えにより、さまざまな効果が期待できる。

● 実用化の課題

アドホックネットワークにおいて NC 情報伝送を実現するには、伝送遅延や情報欠落の考慮が必要である。また、符号化ルーティング制御の複雑さに加えて、各端末が実行する符号化関数を決定するための連携制御も必要である。この符号化関数の決定次第では、最終的に受信端末において送信情報が正しく復号できない場合もあり得る。このためリンク集合の構成に対応して、自身が実行する符号化関数を決定し、これらの情報を端末間で交換するための制御をしなければならない。この制御の複雑さや端末間で交換する情報量の増大が、NC 情報伝送の効率を低下させる大きな原因となる。

■ 開発と評価

● 設計

我々は NC 情報伝送の実現性を検証する目的で、NC アドホック方式を設計した。利用目的を救援活動に限定することにより、端末の移動が計画的であること、また観測時は端末の移動がないことから、各端末がリンク集合と符号化関数を決定する準備段階と、実際に NC 情報伝送を行う実行段階に分離する設計とした。

準備段階では、各端末はアドホックルーティングにより、トポロジ情報を共有して NC 情報伝送の準備を行う。すべての端末は、あらかじめルート集合の計算方法、各端末が実行する符号化関数を決定するアルゴリズムを共通に保持する。このため、送信端末と受信端末の関係をリンク集合に関係なくブロードキャストを用いて通知する単純な手順により、NC 情報伝送の準備が整う。すべての端末は自身がルート集合に含まれるか、含まれるのであれば符号化関数として何を用いるかを自律的に決定できる。

リンク集合は、各端末が共有するトポロジ情報から Dijkstra 法を用いて計算する。送信端末と受信端末間のルート計算を繰り返した結果の OR を、リンク集合とした。繰り返し計算では、前の計算で決定したリンクを次の計算では候補に含めない方法により、相互に独立なリンクを選択する。

実行段階では、各端末が準備段階で決定したリンク集合と符号化関数を用いて、NC 情報伝送を行う。ここでは伝送単位をパケットとしている。図-3 は図-2 に示すトポロジにおいて、端末 T24 が取り扱うパケット構成の例である。パケットには、符号化処理ヘッダ部と送信データ部がある。送信データ部は、センサの観測情報である。符号化処理ヘッダ部には、端末 T24 に対する送信、受信双方のリンク関係を示す送信端末 ID と受信端末 ID、および Network Coding ID (NC-ID) とシーケンス番号が定義される。NC-ID は、ネットワーク内で一意の値であり、各端末が計算したリンク集合と符号化関数を格納するデータベースのテーブル識別子である。送信端末が準備段階で送信端末 ID と受信端末 ID とともに NC-ID を通知することにより、実行段階では中継端末が利用するリンク集合と符号化関数を特定できる。また、端末が符号化する複数のパケットの組合せを判断するために、送信端末が符号化処理ヘッダ部にシーケンス番号を付加する。この結果、中継端末は同一の NC-ID とシーケンス番号を持つデータパケットを受信した場合、これらを 1 つの符号化の組合せと判断できる。

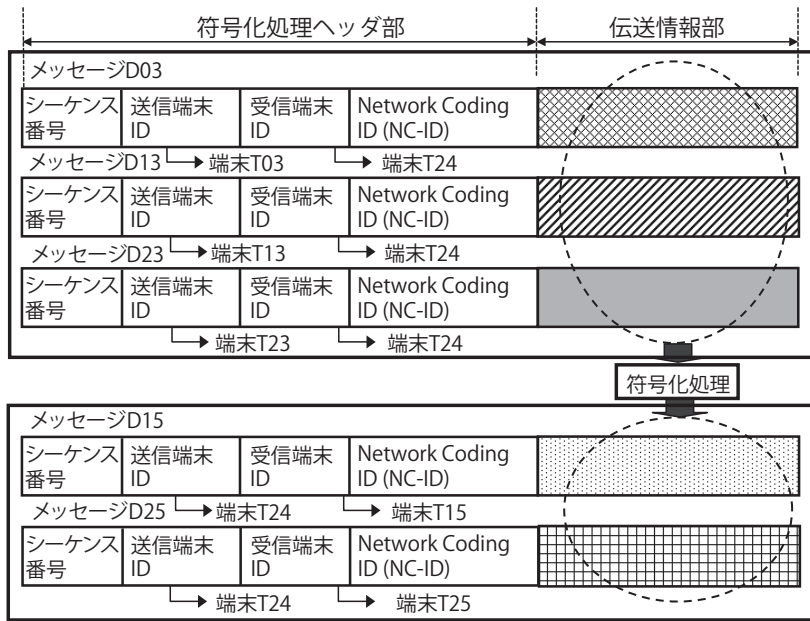


図-3 パケット構成

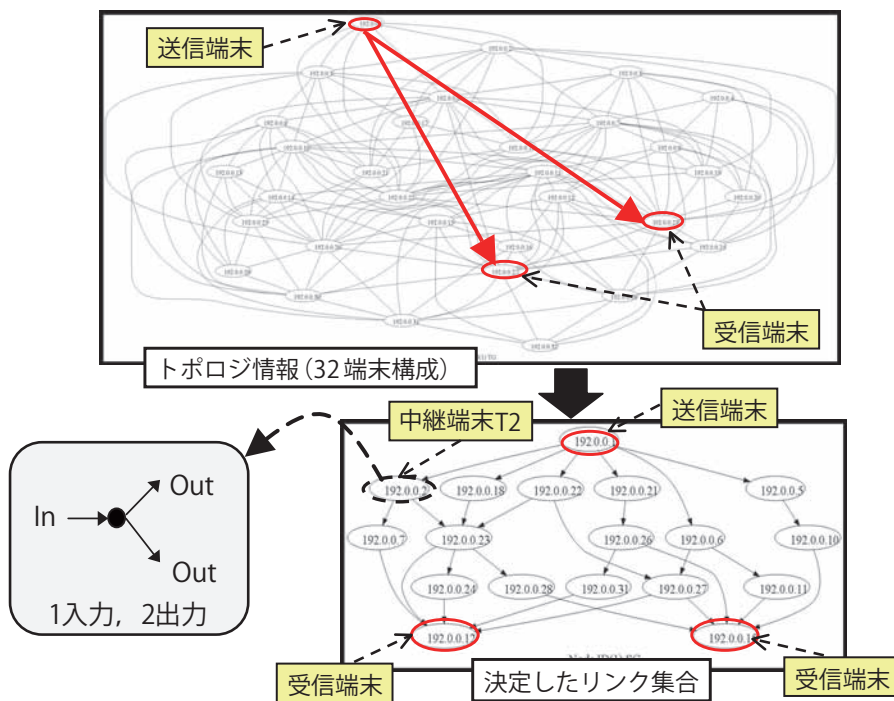


図-4 NC 情報伝送の動作

●NC 情報伝送の動作

NC アドホック方式による NC 情報伝送の基本動作をネットワークシミュレーションにより確認した。ここでは、Dijkstra 法を繰り返す計算回数を「複雑度」と定義し、直感的に NC 情報伝送の形態を図る基準として用いた。

図-4 は、32 端末構成において、各端末が共有するトポロジ情報と、送信端末が 1 対 2 の NC 情報伝送を全端

末に通知した結果として、各端末が独立に計算したリンク集合である。このリンク集合は、複雑度 = 4 である。すべてのリンクが独立に選択されていることは、受信端末の入力が 4 リンクから構成されることから分かる。また、送信端末はリンク集合に属する 18 個の中継端末を介して、2 つの受信端末に NC 情報伝送している。たとえば中継端末 T2 では、1 データパケットの入力に対して、

2つの中継端末にデータパケットを出力する符号化ルーティング特有の動作が確認できる。

また、センサの観測情報を共有するトラフィックを想定して、定周期通信を実行した場合の伝送性能の変化を検証した。複雑度を増加させた場合、送信情報量を増加させた場合、1対N通信の受信端末数Nを増加させた場合に対する伝送性能の関係を、シミュレーションにより評価した。この結果、それぞれの増加に対して、伝送性能は、ある程度までは向上するものの、その後、急激な劣化を示した。これは中継端末においてパケット受信のタイミング差が大きくなり、これらを揃えて行う符号化に遅延が発生することが主な原因である。この影響が他のリンク全体に伝搬して、さらに通信性能を劣化させる悪循環が発生している。この結果、現実のネットワークでは、中継端末が複数のデータパケットを揃えて符号化する遅延が効果を限定的なものとなることが分かった。

今後の展望

我々が設計したNCアドホック方式は、救援活動を利用目的としており、情報伝送遅延や情報欠落を、ある程度予想した設計が可能である。このため、インターネット等の不特定多数、かつ多目的で利用するネットワークよりもNC情報伝送の実現性が高い。シミュレーションによりNC情報伝送の基本的な動作、および限定的ではあるが伝送性能の向上を確認した。この限定を解決する工夫次第では、単に伝送効率やセキュリティの向上にとどまらず、情報欠落や伝送誤りの補完等、新たな効果も期待できる。

Network Coding 研究は始まったばかりである。基本的な実現性を確認したものの、実用化には解決すべき課題が多い。今後はさらに新たなモデルの提案や符号化、ルーティングの工夫、さまざまな通信形態やアプリケーションの提案が活発化すると予想される。引き続き、実用化を目指して、さらに研究を発展させたい。

参考文献

- 1) Ahlswede, R., Cai, N., Li, S.-Y. R. and Yeung, R. W. : Network Information Flow, IEEE Transactions on Information Theory, Vol.46, No.4 (2000).
- 2) Ho, T. and Lun, D. S. : Network Coding An Introduction, Cambridge University Press (2007).
- 3) 山本 幹: ネットワークコーディングとマルチキャスト通信, 情報理論とその応用学会ニューズレター, No.56 (2005).
- 4) Li, S.-Y. R., Yeung, R. W. and Cai, N. : Linear Network Coding, IEEE Transactions on Information Theory, Vol.49, No.2 (2003).
- 5) Ho, T., Medard, M., Shi, J., Effros, M. and Karger, M. : On Randomized Network Coding, Proceedings of 41st Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (2003).
(平成21年11月2日受付)

寺島美昭 (正会員)

Terashima.Yoshiaki@eb.MitsubishiElectric.co.jp

1984年埼玉大学工学部電子工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。現在、同社情報技術総合研究所に所属。センサアドホックネットワーク、分散処理、適合性試験に関する研究・開発に従事。博士(工学)。電子情報通信学会会員。

河東晴子

Kawahigashi.Haruko@ah.MitsubishiElectric.co.jp

1985年東京大学工学部電気工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。現在、同社情報技術総合研究所に所属。高速通信装置、通信トラフィック・経路設計、センサアドホックネットワークに関する研究・開発に従事。博士(工学)。電子情報通信学会、日本OR学会、IEEE各会員。

