

推薦論文

# 階層型Network Coding方式を用いた センサアドホックネットワークの設計と評価

寺島 美昭<sup>1,a)</sup> 清原 良三<sup>2</sup> 河東 晴子<sup>1</sup> 中島 毅<sup>3</sup>

受付日 2011年6月27日, 採録日 2012年5月12日

**概要:** 近年, 被災地の野外に配置した複数のセンサ(端末)が相互に地形変動や温度変化等のセンサ観測情報を交換することにより, 観測の高い精度と迅速な情報共有を実現するセンサアドホックネットワーク実現の期待が高い. 本論文では限られた無線リンクを有効に活用してセンサ観測情報を交換する階層型Network Coding (NC) 方式を提案する. NC理論は符号化とルーティングを組み合わせることにより, Max-flowを実現するグラフ数学の考えである. この理論をセンサアドホックネットワークに応用することにより, 無線伝播の広報性によるメッシュ状のリンク(リンク集合)を駆使して高効率な通信を実現できる. しかし, 現実のセンサアドホックネットワークでは, 複雑なリンク集合による制御パケット量, および中継端末が複数リンクから入力するデータパケットを符号化してルーティングする処理負荷が大きい. これらはデータパケットに欠落を発生させるため, 理論とおりのスループット向上が実現できない原因となる. 提案方式は端末が静的に配置される計画的ネットワーク運用であることを前提に, NC準備段階とNC通信段階を分離した静的NC通信手順を実現する. NC通信段階ではトポロジをグループに分割して管理する階層制御により, 各端末が保持する管理情報を軽減して制御パケット量と処理負荷を軽減する. また, 部分的なリンクに限定した再送制御によりデータパケットの欠落を抑制する. 64 端末を被災地に配置する構成でシミュレーションを行い, 提案方式の適用により, ほぼパケット欠落のないスループット約 2.2 倍を達成した. この結果から, NC理論を応用したアドホックネットワークに実現性があることが確認できた.

**キーワード:** ネットワークコーディング, センサネットワーク, アドホックネットワーク, 階層型ルーティング制御

## Design and Evaluation of Sensor Ad-hoc Network Using the Hierarchical Network Coding Method

YOSHIAKI TERASHIMA<sup>1,a)</sup> RYOZO KIYOHARA<sup>2</sup>  
HARUKO KAWAHIGASHI<sup>1</sup> TSUYOSHI NAKAJIMA<sup>3</sup>

Received: June 27, 2011, Accepted: May 12, 2012

**Abstract:** Realization of the network-sensor data fusion in disaster rescue attracts attention in the research field of ad-hoc network technologies. We have reported the sensor ad-hoc network based on Network Coding theory. Network coding is a particular in-network data processing technique that exploits the characteristics of the wireless medium in order to increase the capacity or the throughput of the network. In this paper, we proposed the hierarchical Network Coding method to increase charged management information in each terminals. We consider some technical issues to implement the information transmission design based on the network coding theory by evaluating simulation results of our design using the proposed method.

**Keywords:** network coding, sensor network, ad-hoc network, hierarchical routing control

<sup>1</sup> 三菱電機株式会社情報技術総合研究所  
Mitsubishi Electric Corporation, Information Technology  
R&D Center, Kamakura, Kanagawa 247-8501, Japan

<sup>2</sup> 神奈川工科大学情報学部情報工学科  
Dept. of Information and Computer Sciences, Kanagawa In-  
stitute of Technology, Atsugi, Kanagawa 243-0292, Japan

<sup>3</sup> 三菱電機株式会社設計システム技術センター

Mitsubishi Electric Corporation, Design Systems Engineer-  
ing Center, Kamakura, Kanagawa 247-8501, Japan

<sup>a)</sup> Terashima.Yoshiaki@eb.MitsubishiElectric.co.jp  
本論文の内容は 2010 年 7 月のマルチメディア, 分散, 協調と  
モバイル (DICOMO) シンポジウム 2010 で報告され, マルチ  
メディア通信と分散処理研究会主査により情報処理学会論文誌  
ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

## 1. はじめに

我々は被災地に配置した複数のセンサ（端末）が相互に観測情報を交換することにより、観測精度の向上と広域情報の迅速な共有を実現するセンサアドホックネットワークを研究している。被災地では障害物や複雑な地形が電波伝搬を妨げるため、限られた無線リンクをメッシュ状に配置して（リンク集合）効率良く通信を行う Network Coding (NC) 理論の応用が適している。しかし、現実のネットワーク上で NC 理論に基づく通信（NC 通信）を実現する場合、複数の受信データパケットを符号化してルーティングする処理（符号化ルーティング）や、リンク集合、符号化関数を端末間で決定する制御が複雑化する。これら通信量と処理負荷は中継端末が受信する複数の入力データパケット到着に遅延を発生させ、さらに、この遅延がリンク集合に伝播することによりスループットが大幅に劣化するという問題がある。現在、NC 理論による秘匿性の実現等、様々な応用に関する数学モデルの研究が活発であるが、このような現実のセンサネットワークでの NC 通信の実現性は十分に議論されていない。

本論文ではセンサアドホックネットワークにおける NC 通信のスループット劣化の傾向と原因をシミュレーションで確認し、この問題を解決する階層型 NC 方式を提案する。提案方式は端末が静止しているときにセンサ観測が行われ、かつセンサ観測情報の配信が定周期で行われる計画的なネットワーク運用であることを前提とする。この前提により全端末がトポロジ情報（Topology Graph）を共有して NC 通信に必要なリンク集合と符号化関数（NC 管理情報）を自律的に決定できる。この NC 準備段階とセンサ観測情報の NC 通信（NC 通信段階）をシーケンシャル実行する手順（静的 NC 通信手順）と、トポロジをグループ（NC グループ）に分割管理する階層制御により、符号化ルーティングを実現する制御/データパケット数を分散化して処理負荷を抑える。また部分的な端末間に限定して再送を行うリンク再送制御により、データパケットの欠落を抑制する。

被災地 5 km × 5 km に 64 端末を配置した環境のシミュレーションにより、提案方式がスループットを約 2.2 倍に改善して、ほぼパケット欠落のない NC 通信が実現できるという結果を得た。この結果から被災地でのセンサアドホックネットワークにおける NC 通信の実現性があることを確認した。

以降では、2 章で NC 通信概要を説明し、実現の課題を分析する。3 章で階層型 NC 方式を提案し、4 章で評価を述べる。5 章で従来研究について述べ、6 章でまとめる。

## 2. NC 通信と実現の課題

本章では NC 理論と NC 通信の動作を述べ、シミュレーションにより実現の課題を検証する。

### 2.1 NC 理論

2000 年に Ahlswede らは文献 [1] において、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考えを NC 理論として提唱した。この考えを実際のネットワーク上で実現する場合、中継端末が 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符号化ルーティングを実行する。この動作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配信型の NC 通信が実現できる。

文献 [2] では、リンクに誤りのない場合を前提とする NC 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（数式 (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（数式 (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。

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

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

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、NC を用いれば、送信ノード  $S$  からすべての受信ノード集合に、同時に容量  $r$  の配信型通信を行えることが NC 理論の基本的な定理である。

NC 通信の動作を、図 1 によりノードを端末と置き換えて、一般的なルーティングである Tree 通信と比較して説明する。Tree 通信は 1 端末が 1 つリンクから情報を受信

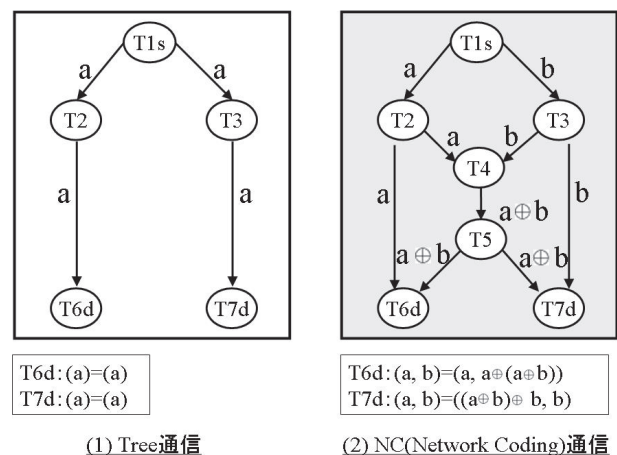


図 1 Network Coding 理論

Fig. 1 Network Coding theory.

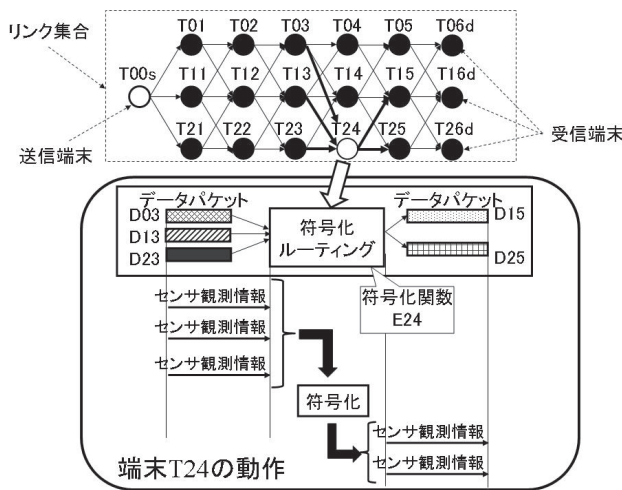


図 2 符号化ルーティングの動作  
Fig. 2 Behavior of NC routing.

し、この情報を 1 つのリンクへ送信するルーティングを用いた通信である。図 1(1) は Tree 通信であり、図 1(2) は Butterfly Network と呼ばれる代表的な NC 通信の構成である。図 1(1), (2) いずれの場合も、端末 T1s から T6d と T7d に対して 1 対 2 の配信型通信を実行している。ここで各リンクが通信可能な情報量を 1 として、それぞれのリンクは相互に独立であるとする。図 1(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) を送信するのに対して、図 1(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) を同時に伝送できる。この例では各端末は、符号化関数として排他的論理和を用いている。このように NC 通信はルーティングと符号化を用いることにより、Tree 型通信と比較して同時に複数の情報を送信してスループット向上を実現できる。

## 2.2 NC 通信

NC 通信は複数の端末から受信する情報を、まとめて符号化して次の複数の端末へ送信する動作を、メッシュ状のリンク集合を用いて繰り返す。この形態は電波の広報性を利用できる無線通信と親和性が高く、また、中継端末に伝送情報の集中により発生するボトルネックを、ルーティングの過程で符号化を施すことにより回避できる。

図 2 は、NC 通信を実現する端末の動作である。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 通信を実行する。たとえば中継端末 T24 は、端末 T03, T13, T23 との間で 3 つのリンクを介して、D03, D13, D23 のデータパケットによりセンサ観測情報を受信する。端末 T24 は、自身が保持する符号化関数 E24 を用いて符号化を行い、計算された情報 D15, D25 を記録したデータパケットを、出力側の端末 T15, T25 へ送信する。この端末の動作が符号化ルーティングである。

この場合の符号化関数 E24 は、符号化ルーティングの入力数 3 と出力数 2 から、数式 (3) に示す 2 行 3 列の行列式で表現できる。符号化ルーティングの実現では、各端末はあらかじめ自身が行う複数の受信 (D03, D13, D23) と送信 (D15, D25) によるリンク集合、および実行する符号化関数 E24 を決定しておく必要がある (NC 管理情報)。リンク集合を構成するすべての端末間が NC 管理情報を調整することにより、中継端末がリンク集合の構成に従って自身の符号関数を用いた計算を繰り返しながら情報を伝送する。あらかじめリンク集合を構成する中継端末が連携して決定する NC 管理情報を参照しながら符号化ルーティングを繰り返すことにより、複数の受信端末が正確に送信されたセンサ観測情報を複合できる。

$$\begin{bmatrix} D15 \\ D25 \end{bmatrix} = E24 \begin{bmatrix} D03 \\ D13 \\ D23 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e24_{11} & e24_{12} & e24_{13} \\ e24_{21} & e24_{22} & e24_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D03 \\ D13 \\ D23 \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 2.3 実現の課題

被災地に展開するセンサには、地形変化の観測や特定地点の温度を観測するもの等がある。たとえば地形変化の観測では、複数地点から同一地形をレーザを用いて観測した情報を補完しあうことにより、高い精度の距離や位置情報を得ることができる。また、自身の観測方向を状況に応じて変化させる等、ネットワークを活用した新たなセンサによる観測方法も期待されている。被災地でのセンサ配置や観測情報を共有するセンサの組合せは、救助方法や被災地の状況に応じてあらかじめ設計される。センサは特定センサ群を指定して一定周期でセンサ観測情報を 1 対 N 通信で配信する。このためセンサアドホックネットワークは、複数の 1 対 N 通信が混在する計画的ネットワークとして運用される。

しかし、被災地での山岳や都市の地形、または倒壊家屋内の複雑な通信環境では、センサ間に様々な電波伝搬を妨げる障害があるため、センサ観測情報を交換するリンクの確保が難しい。このため、我々は被災地においてセンサ間を接続する限られたリンクを有効に活用する NC 理論の適用を検討した。

NC 理論は符号化とルーティングを用いたグラフ数学の考えであるが、現実のセンサアドホックネットワークでの実現では、複雑な NC 管理情報の調整や、メッシュ状の通信によるパケット衝突が予想される。これらは NC 通信の成立自体の阻害や、スループット劣化を招き実現性を損なう原因となる。この問題を確認するために、ネットワークシミュレータ QualNet [3] を用いて、NC 通信のスループットを算出した [4]。

NC 理論では、同一のノード (V) 数から構成されるネッ



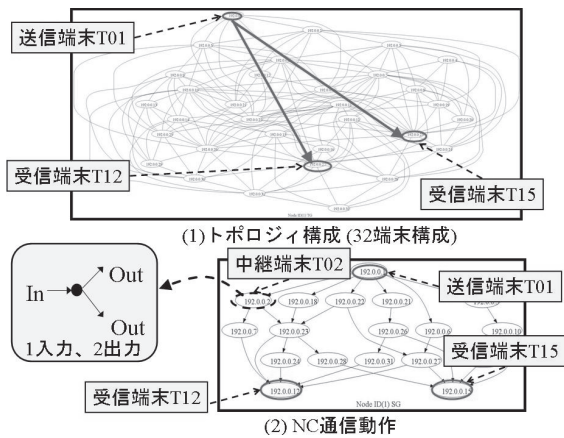


図 3 NC 通信の動作  
Fig. 3 Behavior of NC communication.

トワークにおいて、送信情報をより多く分割して送信するリンク (E) が多いほど高いスループットが実現できる。しかし、実際の NC 通信ではリンクが多い冗長性の高いリンク集合を利用すると、パケット通信の複雑さが増大してスループットをさらに劣化させる。NC 理論に期待するスループット向上とリンク集合の冗長性は、トレードオフの関係にある。このため実際のセンサアドホックネットワークでの NC 通信の実現性を確認するために、同一ノード数での実現の困難さを表現する複雑度を定義した。複雑度は相互独立なリンク集合を計算する際に、トポロジ情報に対してルーティングアルゴリズムを実行した回数としている。この定義を用いることにより同一の 1 対 N 通信を実現するリンク集合の冗長性を、実現の視点であるルーティングを意識した客観的な値として理解できる。

現在の NC 理論の研究では図 1 の例のように、1つの端末の入出力数は 2、あるいは 3 程度が用いられている。このため本論文では NC 通信の実現性を確認するために、一般的な複雑度 = 3 に相当するリンク集合に用いる。シミュレーションは 16 端末を 4 × 4 の格子状に配置し、これを 2 段階積み重ねた合計 32 端末構成を用いた。各端末は格子状の境界端末、および 2 段に組み合わせた上下の境界端末間のみが電波到達範囲にあり、1つの端末に対して複数の入出力リンクが確立できる構成である。格子状の 2 段階配置とした理由は、1 段階の配置では独立に設定できる境界端末数が、たとえば格子の角に配置する端末では 2 となり、複雑度 = 3 のリンク集合を構成できないためである。このように NC 通信を評価するために、トポロジ構成や複雑度を工夫した。

シミュレーションは、図 3(1) に示す合計 32 端末のトポロジ構成において、送信端末 T01 から受信端末 T12, T15 に 1 対 2 の NC 通信を実行してスループットを計算した。センサ間通信モデルとして、CBR (Constant Bit Rate) を 1 対 N の NC 通信に拡張した NC-CBR を用いた。NC-CBR は表 1 に示すパラメータにより、一定周期

表 1 NC-CBR パラメータ  
Table 1 NC-CBR parameters.

番号	パラメータ	機能
1	Src Node ID	送信端末識別子
2	Send Start Time	送信開始時間
3	Send Interval	送信間隔
4	Num of ITEM to send	送信パケット総数
5	Data size	送信パケットサイズ
6	Num of Path	複雑度
7	Num of Targets (max is 10)	送信先端末数
8-18	[target1 node id	送信先端末識別子リスト

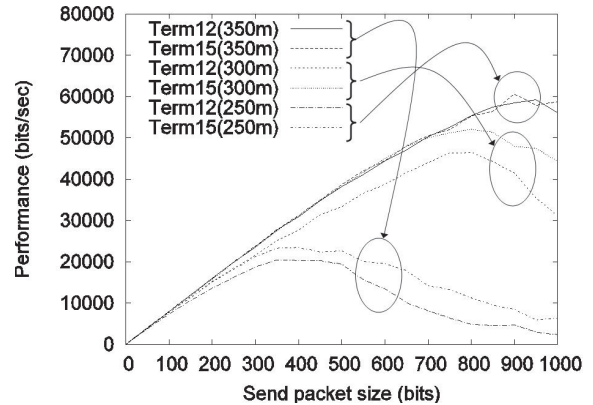


図 4 NC 通信のスループット傾向  
Fig. 4 Throughput of NC communication.

でセンサ観測結果に相当する情報を送信する。たとえば以下の定義は送信端末 T01 から送信端末 T12, T15 の 2 端末に対して、300 bytes のパケットを 0.5 sec 間隔で 1,000 回送信することを意味している。番号 6 に指定する 3 の値が複雑度である。

1 8M 0.5S 1000 300 3 2 12 15

図 3(2) は NC 通信の動作である。実行したシミュレーションログから動作を再現しており、送信端末 T01 から受信端末 T12, T15 に対してリンク集合を用いた NC 通信が行われていることが分かる。この中でリンク集合を構成する中継端末 T02 に注目すると、1 入力 (In) に対して 2 出力 (Out) となる NC 通信特有の符号化ルーティングの動作が確認できる。

図 4 は端末間の距離を 250 m, 300 m, 350 m に増加させた場合の、受信端末 T12 (Term12), T15 (Term15) のスループットである。ここでは送信データ量の増加とともにスループットが増加するが、たとえば 350 m 間隔の場合は送信データ量約 400 bytes をピークに減少に転じる劣化傾向を示している。端末間の間隔を通信状況の良い 300 m, 250 m に変化させると、最大スループットになる送信データ量が、それぞれ 800 bytes, 900 bytes に改善される。端末間の距離とともにスループットが劣化していることから、電波伝搬条件が悪化して、パケット到達の遅延や欠落

が増加していると考えられる。複数入力、複数出力を特徴とする符号化ルーティングでは、この遅延や欠落はリンク集合間を伝播して、スループット劣化の範囲を拡大し劣化幅も増大させる。この問題（符号化ルーティングの同期問題）は、センサアドホックネットワークにおける NC 通信の実現性を損なう原因となる。

符号化ルーティングの同期問題の原因として、NC 通信特有の 2 つの要因を分析した。第 1 の要因は端末間で交換する、NC 通信を構成するために必要な情報量の増大である。リンク集合は、Topology Graph に対して送信端末と受信端末の関係から、この間をメッシュ状に接続する複数のリンクである。同じく符号化関数は、リンク集合の構成に対応して、符号化ルーティングを行う端末の構成や位置に合わせて決定する。たとえば各端末は境界端末との入力数や出力数が異なるため、それぞれが自身の適切な符号化関数を決定しなければならない。このため各端末は、保持する Topology Graph 等の情報量が拡大し、これらの調整や、欠落を補うデータパケット再送等の制御/データパケット数が増大する。この増大により、特に入出力リンク数が多い中継端末には処理負荷が集中することになる。

第 2 の要因は、リンク集合を伝達するデータパケットや制御パケットの衝突である。Tree 通信では送信端末と受信端末を接続するルートに沿ってすべての端末がマルチホップで接続されるため、たとえばパケット欠落による再送判断等の伝達手順は一意に決定できる。これに対して NC 通信は、リンク集合に対応して入力数や出力数の異なる端末間で情報を交換するため、制御情報を受け渡すルートやタイミングが容易に決定できない。このためパケット衝突による欠落が多発する。

### 3. 階層型 NC 方式の提案

本章では、符号化ルーティングの同期問題を解決する階層型 NC 方式を提案する。提案方式は計画的ネットワーク運用を前提に、NC 通信でセンサ観測情報を配信する段階（NC 通信段階）と、NC 管理情報を準備する段階（NC 準備段階）を分離した静的 NC 通信手順を用いる。またリンク集合をグループ単位（NC グループ）に分割して管理する階層制御による制御/データ通信量と処理負荷の抑制、リンク間に限定して制御通信を最低限に抑えたリンク再送制御によるパケット欠落の抑制により、符号化ルーティングの同期問題を解決する。

#### 3.1 静的 NC 通信手順

##### 3.1.1 基本手順

提案方式による静的 NC 通信手順を図 5 に示す。ここでは送信端末、中継端末、受信端末の動作を示している。各端末は呼び出す API（Application Programming Interface）対応に、表 2 の機能を実行する。nc\_init(), nc\_open(),

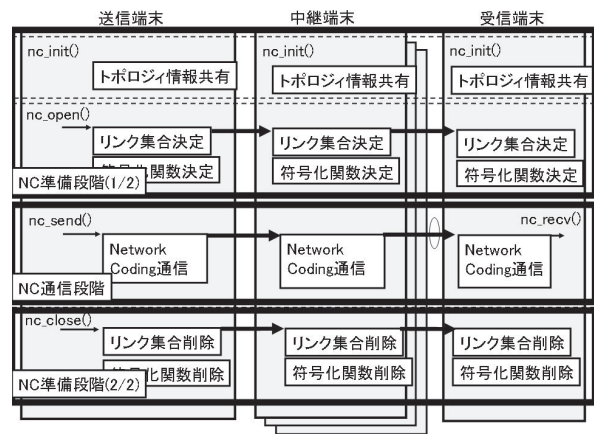


図 5 NC 通信の手順

Fig. 5 Message sequence of NC communication.

表 2 NC 情報伝送を実現する API

Table 2 Application interface of NC communication.

Application API	機能
nc_init()	トポロジ共有
nc_open()	リンク集合決定, 符号化関数決定
nc_send()/nc_recv()	NC 情報伝送の実行
nc_close()	リンク集合削除, 符号化関数削除

nc\_close() は NC 準備段階の機能、nc\_send() と nc\_recv() は NC 通信段階の機能である。

計画的ネットワーク運用であることを利用して、全端末があらかじめ同一のリンク集合と符号化関数の決定アルゴリズムを搭載し、NC 準備段階でアドホックルーティング・プロトコルを用いて Topology Graph を共有することにより、NC 通信前に NC 管理情報を自律的に決定する。この NC 準備段階と NC 通信段階を分離した手順により、NC 通信段階で NC 管理情報を決定する制御負荷を抑制する。

提案方式はアドホックルーティング・プロトコルとして、MANET (Mobile Ad-hoc NETwork) TBRPF (Topology dissemination Based on Reverse-Path Forwarding) [5] を採用している。プロアクティブ型ルーティングを行う TBRPF は隣接端末を監視し、その結果から差分情報を定期的に交換する。最低限の情報交換によりルーティング段階の制御通信の負荷を抑えて、すべての端末が Topology Graph を共有するのに適している。

##### 3.1.2 NC 準備段階

NC 準備段階では、NC 通信の前処理を行う。提案方式は TBRPF 仕様である Neighbor Discovery Control Protocol と Topology Control Protocol に加えて、Coding Control Protocol を合わせた 3 種類の制御プロトコルを備える。Neighbor Discovery Control Protocol は、隣接端末を検索するための手順を提供する。各端末は隣接端末の情報を保持し、Topology Control Protocol を用いて、一定周期で周辺の端末にトポロジ情報を通知する。この動作を一定時間、繰り返すことにより、最終的に全端末が同一の

Topology Graph を保持できる. この機能は nc\_init() で実行する.

Coding Control Protocol は各端末が NC 管理情報を決定するために拡張した制御プロトコルである. 送信端末は実現する NC 通信の構成情報 (NC 構成情報) として, 自身の識別子 (端末 ID) とともに受信端末 ID を全端末に通知する. 同時に NC 通信を一意に識別する Network Coding ID (NC-ID) も送る. この送信端末 ID と受信端末 ID を受信した各端末は, それぞれが保持する Topology Graph から NC 通信に必要な NC 管理情報を計算し, この結果を NC-ID により識別できるように保持する. リンク集合は Topology Graph から Dijkstra 法を用いて計算する [6]. これは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排他的論理和をリンク集合として計算する方法である. 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, 相互独立なリンクが選択できる. この機能は nc\_open() で実行し, NC 通信終了後の NC 管理情報の開放は nc\_close() で行う.

この NC 準備段階の制御により, 各端末は Tree 通信のようにルーティングに沿って制御パケットを伝える必要はない. 送信端末が全端末に NC 構成情報をブロードキャストすると, 受信した端末は NC 管理情報を計算する. この結果, 自身がリンク集合のメンバであると判断した場合は, 送信端末に応答を返す. この単純な手順により, 制御の複雑さと交換する NC 格子柄情報の量を削減できる. この Coding Control Protocol の詳細手順は, 3.2.2 項「端末/NC グループ識別」と 3.2.3 項「NC 階層制御手順」で説明する.

### 3.1.3 NC 通信段階

NC 通信段階では, 端末間でデータパケットを用いた NC 通信によりセンサ観測情報を配信する. 図 6 は, 図 2 に示す端末 T24 を例にしたデータパケットである. データ

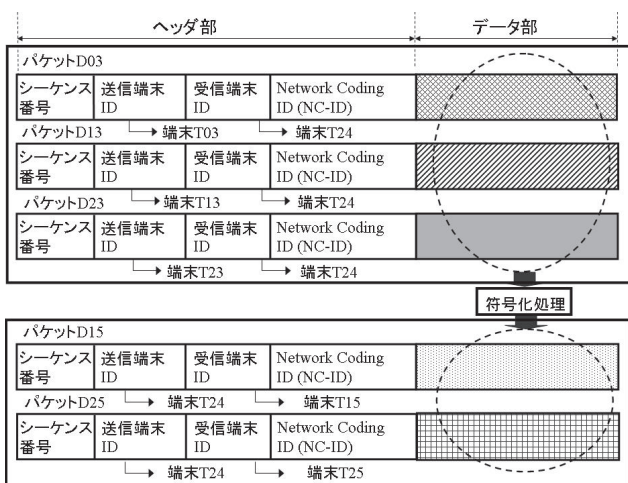


図 6 データパケット構成

Fig. 6 Data packet format of NC communication.

パケットのヘッダ部には, 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 NC-ID とシーケンス番号が定義される. 送信端末は NC 準備段階において自身の ID, 受信端末 ID とともに NC-ID を通知しているため, 中継端末は NC-ID をキーとして, 符号化する複数のデータパケットの組合せと自身が受信, 送信する端末の特定, 実行する符号化関数を検索する. 中継端末は同一の NC-ID とシーケンス番号を持つ複数のデータパケットに対して, これらのデータ部を 1 つの符号化単位と判断できる. 送信と受信の機能は, それぞれ nc\_send() と nc\_recv() で実行する.

データパケットのデータ部には, 符号化関数を用いて符号化するセンサ観測情報が格納される. ここでは端末 T24 は NC 実行段階において, 端末 T03, T13, T24 から入力する情報 D03, D13, D23 を符号化関数 E24 で符号化し, この結果である情報 D15, D25 を端末 T15, T25 へ出力する例を示している.

## 3.2 階層制御

### 3.2.1 NC 階層モデル

提案方式は, リンク集合を複数の NC グループ単位で分散して管理する階層制御により, 端末に集中するパケット数と衝突のタイミングを抑制してパケット欠落を軽減させる. この制御を階層型を用いない方式 (従来方式) と比較して説明する. 図 7 は 64 端末を配置した同じトポロジ構成に対して, (1) 従来方式と, (2) 提案方式による制御の違いを示している. 従来方式は 1 グループ構成と等価である. これに対して提案方式は, NC グループ 1~4 の, 4 つの NC グループ構成である. いずれの場合も, 端末 T01 から端末 T44, T48, T47 に対して 1 対 3 の NC 通信を実行している.

NC 通信を実現するために各端末が保持する Topology Graph と Group Topology Graph の違いを, 図 8 と図 9

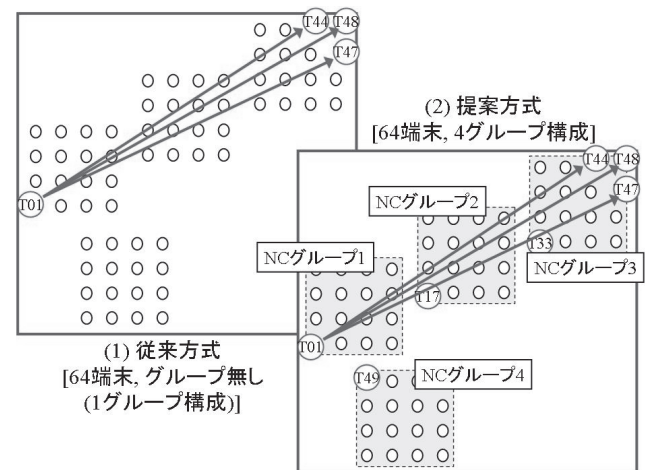


図 7 提案方式と従来方式の比較

Fig. 7 Conventional method and proposed method.



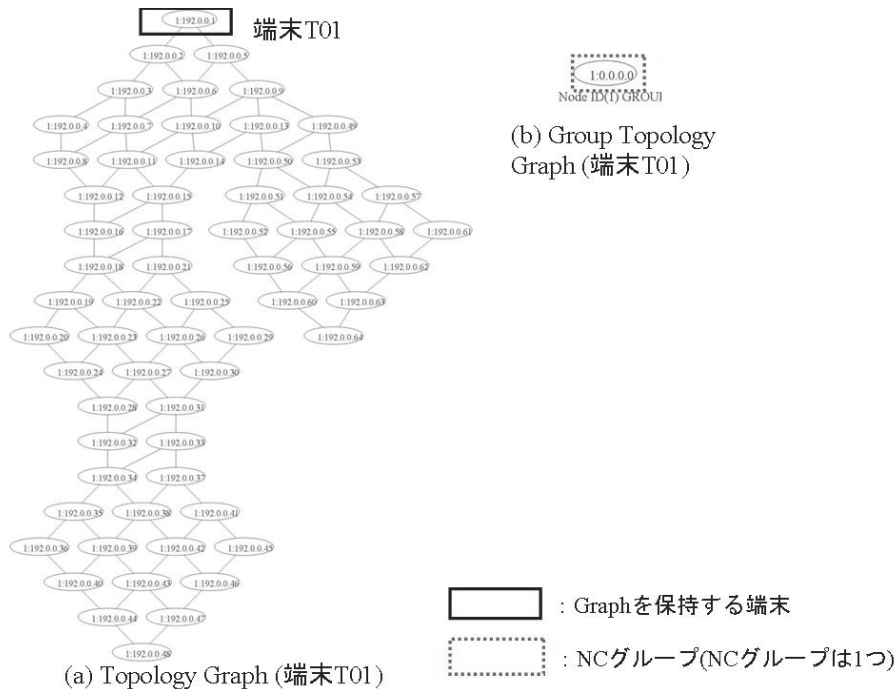


図 8 従来方式の Topology Graph  
Fig. 8 Topology graph of conventional method.

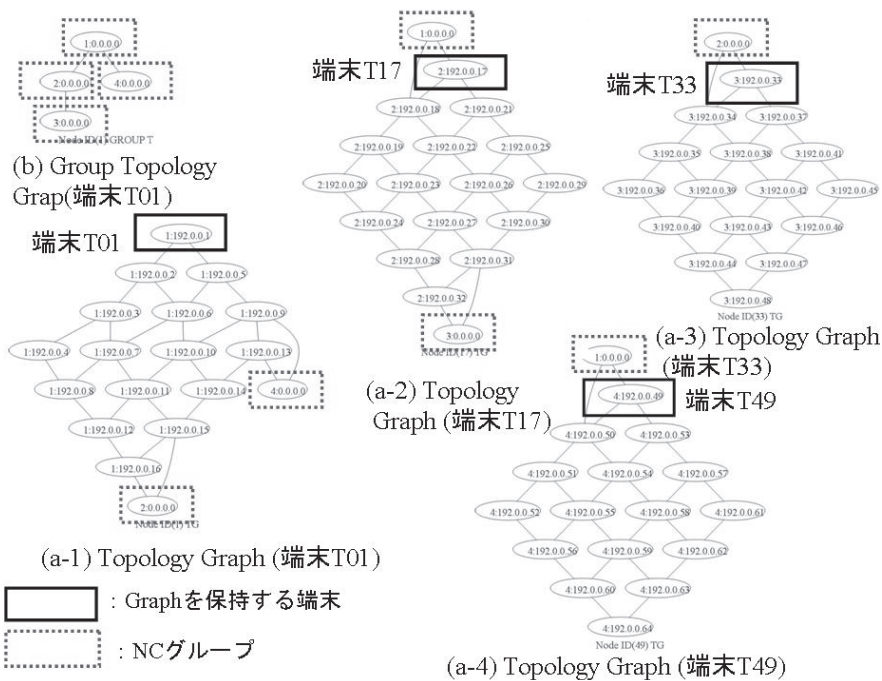


図 9 提案方式の Topology Graph (4 グループ構成)  
Fig. 9 Topology graph of proposed method (4 groups).

を用いて説明する。Group Topology Graph は、提案方式において NC グループ構成を管理するために定義したトポロジ情報である。図 8 は、図 7(1) 従来方式の構成において、送信端末である端末 T01 が保持する (a) Topology Graph と (b) Group Topology Graph を例として示している。(b) Group Topology Graph は、1つのグループ識別子を保持しており、この構成が従来方式で管理されている

ことを意味している。(a) Topology Graph は、すべての端末間の隣接関係を示している。ここで□で囲んだ端末識別子が例とした端末 T01 である。(a) Topology Graph は、他の 63 端末とのすべての隣接関係の情報を保持しており、全端末が端末 T01 と同じ情報量を保持している。

図 9 は、図 7(2) に示す提案方式の場合である。(a-1), (a-2), (a-3), (a-4) は、NC グループ 1, 2, 3, 4 に属する

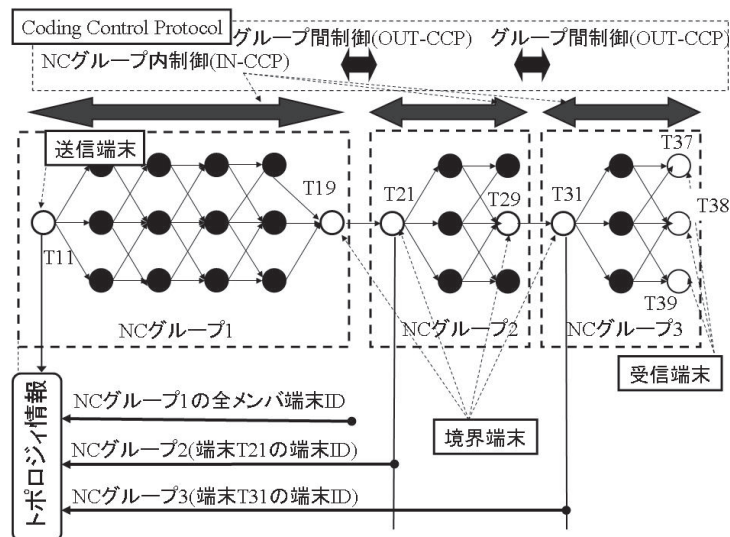


図 10 端末の識別方法  
Fig. 10 Terminal identification.

端末 T01, T17, T33, T49 を例に、それぞれが保持する Topology Graph を示している。また、(b) Group Topology Graph は端末 T01 の例であり、64 端末すべてが保持する情報である。ここで□で囲んだ端末 T01, T17, T33, T49 は、他の NC グループに属する端末と隣接する端末（境界端末）である。境界端末は隣接する NC グループ側の境界端末とのリンク情報のみを保持し、隣接 NC グループに属する他のメンバ端末の情報は保持しない。この結果、各端末が保持する Topology Graph は、図 8 に示した端末 T01 の例と比較して約 1/4 に削減できる。この効果が NC 通信を実現するときに端末が参照する NC 管理情報量を抑えて、制御/データパケット数と処理負荷を軽減する。

### 3.2.2 端末/NC グループ識別

階層型のトポロジ管理は、アドホックネットワークにおける Topology Graph 管理やリンク検出の制御負荷を軽減する効果が知られている [7]。提案方式では、計画的ネットワーク運用であることを利用して、あらかじめ NC グループ構成を決定しておき、以下に示す端末 ID 定義から所属する NC グループを自律的に特定する静的な管理を行う。この方法により NC グループのメンバ端末を管理する特別なグループ管理を必要とせず、制御パケット数の増加を抑えることができる。

$$\text{端末 ID} = \text{グループ識別子} + \text{端末固有識別子}$$

この端末 ID から NC グループを分析して NC 通信を実現する動作を、図 10 を用いて説明する。この例では NC グループ 1, 2, 3 から構成される 28 端末構成において、NC グループ 1 に属する端末 T11 が送信端末となり、NC グループ 3 に属する端末 T37, T38, T39 へ 1 対 3 の NC 通信を実行している。また、境界端末は NC グループ 1 では端末 T19, NC グループ 2 では端末 T21 と T29, NC グループ

3 では端末 T31 である。NC 準備段階で NC 管理情報を決定する Coding Control Protocol は、NC グループ内制御である Coding Control Protocol (IN-CCP) と、NC グループ間制御である Coding Control Protocol (OUT-CCP) の 2 種類から構成される。IN-CCP は、NC グループ内で NC 管理情報を決定する。OUT-CCP は、Group Topology Graph に関するルーティング、および NC グループの中継端末が NC 管理情報を決定するために、送信端末 T11 が送信する NC 構成情報を NC グループ 2, 3 に伝達する通信を行う。この階層制御により送信端末 T11 が保持するトポロジ情報は、以下に限定される。

- NC グループ 1 の全メンバ端末 ID。
- NC グループ 2（端末 T21 の端末 ID）。
- NC グループ 3（端末 T31 の端末 ID）。

端末 T11 は端末 T21 と T31 の端末 ID から自身が属する NC グループ 1 と、それぞれが所属する NC グループ 2, NC グループ 3 のリンク関係を Group Topology Graph として保持している。このため、たとえば端末 T11 が NC グループ 2 へ NC 通信を実行するときは、端末 T21 を境界端末とする端末 T19 への送信が判断できる。また、端末 T37, T38, T39 へ NC 通信を実行するときも、それぞれの端末 ID から NC グループ 3 に所属することが分析できるため、隣接 NC グループ 2 への隣接端末となる端末 T19 へ送信すればよいと判断する。

この計画的ネットワーク運用を前提とした端末 ID を用いた識別により、各端末は自身が所属する NC グループの端末 ID を持つ Topology Graph と、Group Topology Graph に限定して保持する。この方法により、各端末が保持する NC 管理情報の削減と処理負荷の軽減を実現する。

### 3.2.3 NC 階層制御手順

図 11 は、図 5 の構成における Coding Control Protocol



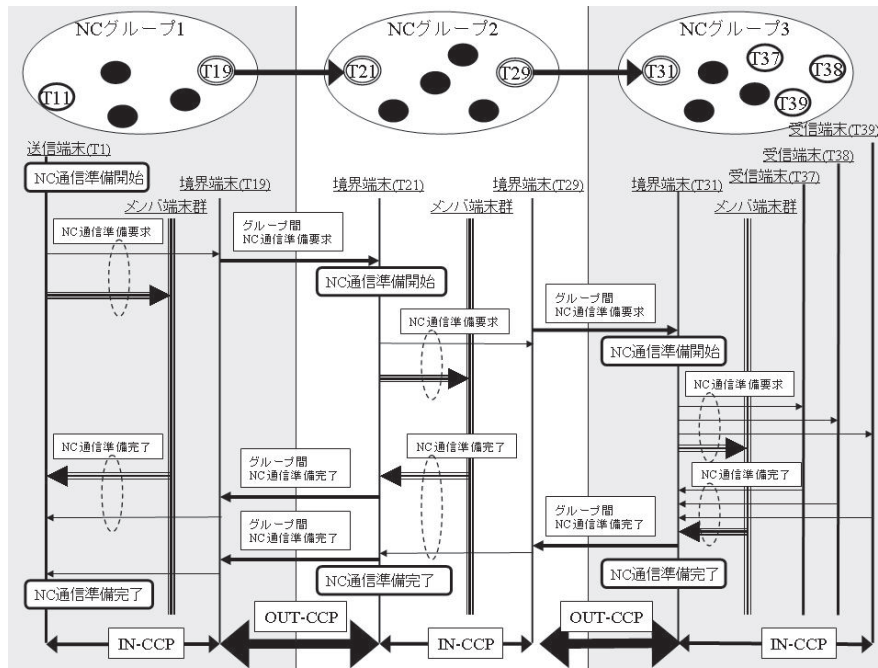


図 11 NC 階層制御手順

Fig. 11 Message sequence of coding control protocol.

の詳細手順である．ここですべての端末は、nc\_init()により Topology Graph と Group Topology Graph の共有を完了しているものとする．送信端末 T11 は、nc\_open() を呼び出して Coding Control Protocol を起動することにより、受信端末となる端末 T37, T38, T39 への NC 通信準備を開始する．

IN-CCP は NC 通信準備要求パケットを用いて、NC 構成情報を NC グループ内のメンバ端末群にブロードキャストし、この結果、自身がリンク集合のメンバ端末であると判断した端末からのみ、NC 通信準備完了パケットを受信する．すべての端末はトポロジ情報と複雑度をあらかじめ共有しているため、受信する NC 構成情報から自身がリンク集合に含まれる中継端末であるか、あるいは受信端末であるかを判断する．同様に OUT-CCP はグループ間 NC 通信準備要求パケットを用いて、NC グループの境界端末間で NC 構成情報を伝え、この結果をグループ間 NC 通信準備完了パケットで受信する．グループ間 NC 通信準備要求パケットを受信した境界端末は、自身が所属する NC グループ内の送信端末としての役割を持ち、IN-CCP を用いて NC グループ内の全端末へ NC 通信準備要求パケットをブロードキャストする．

最終的に送信端末 T11 は、すべての NC グループに所属する全端末に NC 構成情報を配信し、リンク集合を構成する端末に NC 構成情報の決定とセンサ観測情報の中継、あるいは受信端末としての準備を完了させる．図 11 の例では、送信端末 T11 は、自身が所属する NC グループ 1 内の端末、および NC グループ 2, 3 内で送信端末の役割を持ち、NC 通信の準備を主導する端末 T21 と T31 から NC

通信準備完了パケットを受信することにより、NC 通信準備完了を判断する．

この Coding Control Protocol により、NC 通信準備段階でのリンク集合とメンバ端末の NC 管理情報の決定、および全メンバ端末での NC-ID の共有を、複雑なリンク集合にかかわらず単純な制御パケットの手順で実現する．

### 3.3 リンク再送制御

リンク再送制御は、符号化ルーティングにおけるデータパケットの欠落を防ぐために、受信タイムアウトを検出したリンク間に限定してデータパケットを再送する方式である．再送によるパケット欠落の回避は、Tree 通信では一般的な方法であり、送信端末が再送する方法やパケット欠落が発生したリンクに限定して再送する方法が利用されている．

しかし NC 通信では、異なるルートをたどって受信する複数の入力データパケットを同期させて符号化するため、再送を送信端末に通知する適切なルート選択が困難である．この制御パケットがさらにリンクの帯域を圧迫して欠落を拡大させる恐れもある．また送信端末への通知を必要としないリンク部分での再送では、個々の中継端末の入出数が異なり、かつ受信するパケットが送信端末からたどるルートが異なるため、適切な再送期間や周期は端末ごとに異なる．NC 通信は各端末が符号化ルーティングにより同期的に動作するため、たとえばネットワーク全体で同一周期と再送時間の再送を用いた場合、中継端末で発生するタイミングのズレは NC 通信全体の成立を妨げる恐れもある．この NC 通信固有の課題の解決として、我々はリンク再送制

御を検討した。

リンク再送制御は、アプリケーションが定周期に観測情報を配信するという特徴を利用して、再送期間と再送周期を各中継端末が自律的に判断して、特定のリンクに限定して再送を行う方法である。送信元となる端末は、受信元となる端末から到達確認が検出できない場合は再送を開始する。ここでセンサ観測情報の送信周期よりも送信が遅れることを判断すると、自律的に再送を停止して新たなセンサ観測情報を伝送する。この方法により、再送のための制御パケットを最低限に抑えることができる。

図2の端末T24の符号化ルーティングの例では、D03, D13, D23のデータパケットがタイムアウト時間内に受信完了できない状況が発生すると、端末T03, T13, T23は1ホップ間のみで自身への入力数と到着時間から周期を決定して再送を開始する。再送周期は、過去に到着確認を受信した時間から端末ごとに統計的に決定する。すべての端末が共有している観測周期から、この時間内の再送でも受信できないと判断した場合は、再送を中止して次の観測結果であるデータパケットの送信を開始する。この方法により、その周期のセンサ観測情報は無効となるものの、次の周期の観測情報が利用できるため、観測精度向上に対して有効である。

## 4. 評価

### 4.1 方法

提案方式によるスループット向上の効果を確認するために、シミュレーションによる3つの実験から提案方式と従来方式の効果を比較、検証した。評価モデルは図7に示す64端末を配置した端末構成である。被災地でのセンサ観測を想定して[8]、端末を5km×5km範囲に300m間隔で配置している。従来方式との比較のために実験パラメータとして、1データパケットの送信データ量100bytesから最大1,000bytes、送信間隔0.5sec、複雑度3を設定した。送信間隔と複雑度の値は、2.3節で実現の課題を分析したシミュレーションで、実現可能な最大性能を示した値である。

図7では、4×4の格子状に配置したNCグループを4つ設置している。1つのNCグループは、一般的なアドホックネットワークで利用されるホップ数3~4が可能な規模である。また格子状の端末配置は、各端末が相互に独立な複数の入力と複数の出力を確実に確保する構成であり、ここでは4方向にリンクを確保できる。たとえばランダム配置では必ずしも必要なリンク数が確保できるとは限らず、リンク集合とスループット劣化傾向の関係を明らかにできない。階層型NC方式では計画的に保持している符号化関数の決定アルゴリズムを用いて、全端末が共有するトポロジ情報からリンク集合を計算するため、グリッド型やランダム型等の配置位置には依存しない。このため、このNC通信評価に適した端末配置を用いて評価を行った。当然、

端末位置や通信距離に応じた電波伝搬環境の違いによるリンク集合の構成しやすさや、高い性能が出る配置等がある。本論文ではリンク集合の構成とスループットの関係からNC通信の実現性の確認に焦点を当てた評価を行い、多様な端末配置や通信距離による実運用に向けた評価は今後の課題に整理する。一方、実際のセンサアドホックネットワークの運用でも、観測の利用目的に応じて計画的に端末配置が決められるため、ランダム配置のような偶然に期待してリンク集合を構成する利用は考えられない。

4.2.1項では、階層制御によるNCグループへの制御/データパケットの分散化、およびリンク再送制御による制御パケット数抑制による各端末が取り扱うパケット数の削減を確認する(実験1)。4.2.2項では、実験1で確認したパケット数の削減が、パケット到達率とスループットに与える効果を(実験2)、また、4.2.3項ではリンク再送制御による再送回数とスループットの関係を検証する(実験3)。最後に4.3節で、提案方式によるスループット向上の結果と、今後の課題を考察する。

## 4.2 結果

### 4.2.1 実験1：パケット通信量削減の効果

実験1では、階層制御によるNC準備段階とNC通信段階での制御/データパケット数削減、NC準備段階では、さらに制御パケットを最低限に抑えたリンク再送制御による削減をあわせて従来方式と比較した。

NC準備段階では、nc.init()を起動して全端末がTopology Graphを共有するために、またnc.open()によりNC構成情報を全端末にブロードキャストしてNC通信準備を完了するために、表3に示す制御パケット数を必要とした。提案方式は、制御パケットの量をNCグループごとに算出している。この実験では受信制御パケット数の総量を比較すると、削減率は約0.7%、また同じく送信制御パケット数の削減率は約6.2%という結果である。いずれも提案方式の方が削減に効果があるものの、従来方式も静的NC通信手順を採用しているため、ネットワーク全体のパケット総量で比較した場合の削減率は小さい。しかし、提案方式の各NCグループごとのパケット送受信量と比較した場合、たとえば3つの受信端末を含み制御パケットの送受信が最も多いNCグループ4の場合では、削減率は73.6%と74.6%と大きい。この結果から、NC階層制御手順により制御パケットが期待どおり4つのNCグループへ分散化されていることが確認できる。

NC通信段階では、nc.send()を起動してセンサ観測情報をNC通信を用いて配信するために、表4に示す制御/データパケット数を必要とした。IPレベルの再送パケット総量を比較すると、提案方式は従来方式に対して53.6%の大幅な削減の結果が得られた。これはNC準備段階と同様に階層制御による制御/データパケットの分散化に加え、リ

表 3 NC 準備段階での制御パケット総量の比較

Table 3 Relation between packet amount at NC preparation phase.

グループ指定	Group	受信制御パケット数 [個]	送信制御パケット数 [個]
従来方式 (1 グループ)	-	96,735	34,944
提案方式 (4 グループ)	1	23,990	8,054
	2	21,753	7,248
	3	24,771	8,599
	4	25,504	8,861
	合計	96,018	32,762

表 4 NC 通信段階でのデータパケット総量の比較

Table 4 Relation of data packet amount at NC communication phase.

グループ指定	受信パケット数 [個]	送信パケット数 [個]	再送パケット数 [個]
従来方式 (1 グループ)	87,122	46,364	3,362
提案方式 (4 グループ)	76,769	37,559	1,559

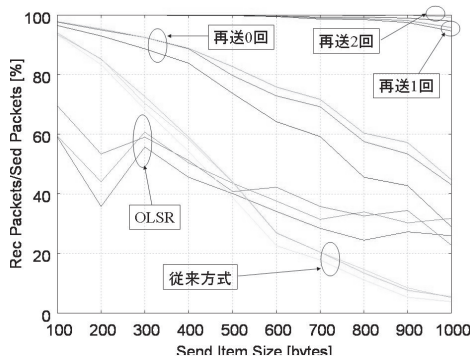


図 12 パケット到達率の比較 (提案方式と従来方式)

Fig. 12 Relation between packet arrival factors (Conventional method and proposed method).

リンク再送制御により制御パケット数を抑えた効果である。ここでは NC 通信段階では受信パケット数が 11.9%、送信パケット数が 19.0%減少することを確認した。

以上から NC 準備段階と NC 通信段階では、階層制御とリンク再送制御により制御/データパケット数が分散化され、個々の端末が取り扱うパケット数が削減されて特定端末への負荷集中が回避されることが確認できた。NC 通信段階での再送パケット数の削減には、パケット数自体が少ない階層型 NC 方式の設計であることに加え、取り扱うパケット数が減少して衝突の機会が減ったことによる相乗効果もあると考えられる。

4.2.2 実験 2：階層制御の効果

実験 2 では、実験 1 で確認した制御/データパケット数削減がスループット改善に与える効果を確認するために、まず図 12 で従来方式と提案方式 (再送 0 回) のパケット到達率を比較した。提案方式は再送回数 0 回とすることで、階層制御のみを有効とする設定である。なお、図 12、および後に説明する図 13、図 14 に示す方式ごとの 3 つの結果は、実行した 1 対 3 の NC 通信における 3 つの受信端末の計算を示している。

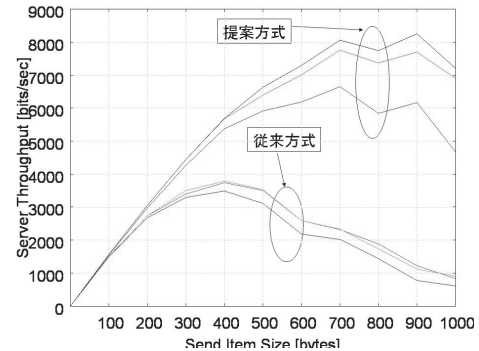


図 13 スループットの比較 (提案方式と従来方式)

Fig. 13 Relation between throughputs (Conventional method and proposed method).

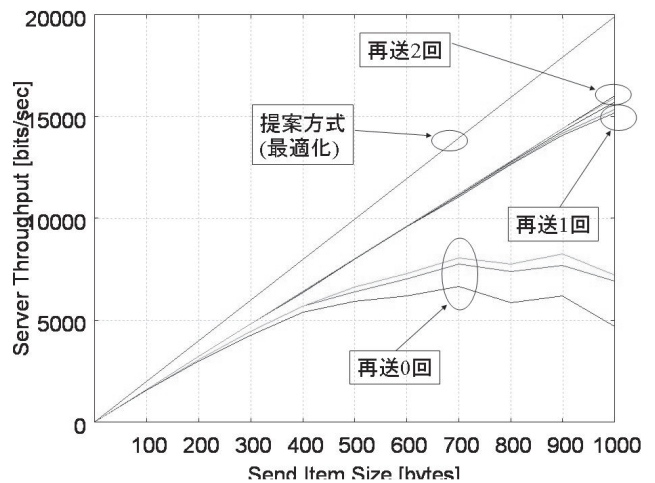


図 14 スループット改善の傾向 (提案方式)

Fig. 14 Throughput results of proposed method.

また一般的な Tree 通信との差を検証するために、図 7 のトポロジ構成を用いてプロアクティブ型アドホックルーティング方式である OLSR (Optimized Link State Routing) [9] のパケット到達率も示している。OLSR を用いたデータ通信は、UDP (User Datagram Protocol) で再送な



しで実行することにより、提案方式、従来方式と同様に1対3通信をTree通信により実現している。同じNC通信を実現する従来方式との相対的なスループットの改善効果に加えて、OLSRと比較することにより、一般的なTree通信に対する階層型NC方式の絶対的な効果も確認する。

従来方式とOLSRの比較では、送信データ量が500 bytes以上になると、パケットの欠落が多発し従来方式でもNC通信に期待した効果が得られていないことが分かる。送信データ量が500 bytesの送信データ量のときは、受信端末T44, T47, T48のパケット到達率の平均は41.5%である。これに対して従来方式(再送0回)は42.2%で大きな変化はない。これに対して提案方式は、同じ送信データ量で78.7%を達成しており大きな改善が見られる。この結果から従来方式によるNC理論の適用には限界があるが、提案方式は従来方式の限界を超えて、つねにTree通信よりもスループット改善に有効であることが確認できた。

次に同じNC通信を実現する従来方式に対する提案方式の改善の大きさを確認するために、図13で提案方式と従来方式のスループットを比較した。従来方式の結果は、図4と同じ評価を図7の構成で実施したものである。従来方式では送信データ量約400 bytesの場合をピークに劣化するのに対して、提案方式は700 bytesまで大きな劣化が見られず、大幅なスループット改善が確認できる。ただし、送信データ量700~900 bytes間で最大のピークとなり、その後は同様に劣化する。従来方式の最大スループットである送信データ量400 bytes時の値は、3つの受信端末の平均で3,671.3 bytes/secである。これに対して提案方式は5,584.0 bytes/secであり、約1.52倍の向上を達成している。また提案方式の最大スループットである送信データ量900 bytesの値は、7,376.0 bytes/secであり、最大スループットと比較すると約2.0倍を達成している。送信時データ劣化が始まる送信データ量も、従来方式が400 bytes送信時であることにに対して提案方式は700 bytesであり約1.75倍に拡大している。

以上から従来方式は送信データ量が大きくなると、Tree通信より高いパケット欠落が発生する。これに対して提案方式はつねにTree通信よりも高いパケット到達率を維持しており、NC理論の効果を実際のセンサアドホックネットワークで実現できることが確認できる。

#### 4.2.3 実験3: リンク再送制御の効果

実験3では、実験1で確認したリンク再送制御による自律的なデータパケット再送によるパケット欠落の補完が、スループット改善に与える効果を確認するために、図12で従来方式と提案方式のパケット到達率を比較した。提案方式のパケット到達率は、再送回数0回の送信データ量500 bytesの場合に、3受信端末の平均で約78.7%まで劣化し、1,000 bytes送信時には38.9%まで下がる。しかし、提案方式では再送2回の場合は約99.7%と、ほぼパケット欠

落のないNC通信を実現している。

図14は、達成したパケット到達率の結果として、提案方式が実現したスループットである。ここに示す再送回数0回の結果は、図13の提案方式の再送回数0回と同じデータを比較のために示している。提案方式において3つの受信端末の平均が最大スループットを示した送信データ量約700 bytesのときに平均スループットが7,494.0 bytes/secで頭打ちになるが、再送回数1回ときは11,105.3 bytes/sec、再送回数2回ときは11,212.0 bytes/secであり、それぞれ1.48倍、1.50倍にスループットが向上している。

以上から提案方式のリンク再送制御の適用により、つねにTree通信よりも高いパケット到達率の維持が可能であり、従来方式と比較しても大幅な改善の効果があることが確認できた。この結果、符号化ルーティングにより同期的に動作するNC通信では、各端末が自律的に再送時間と周期を決定する自由度が、スループット改善に効果的であることが分かった。

#### 4.3 結論

実験1, 実験2, 実験3で用いたパラメータは、従来方式と比較するために、図4の実験で用いた従来方式で最大スループットとなる値である。このため従来方式に対する提案方式の最大の改善効果を確認するために、提案方式が実現できる最速の送信周期をNC-CBRを用いて検索した。提案方式はパケット通信が単純化されているため、従来方式よりも早い周期でのNC通信が可能である。この結果として得たデータパケット送信間隔0.4 secの値を用いてスループットを計算した結果が図14の提案方式(最適化)である。図13で示した従来方式の3,671.3 byte/secと比較すると同じ送信データ量400 bytesのときは7,968.7 bytes/secであり約2.2倍を達成している。この結果は提案方式が再送回数の調整で最適化できるトポロジ構成やNC-CBRの範囲が広く、スループット向上の効果も大きいことを示している。

以上の評価から提案した階層型NC方式によるパケット到達率改善が、符号化ルーティングの同期問題を解決して約2.2倍のスループット向上を実現するという結論を得た。パケット到達率は、ほぼ欠落のない通信を実現していることから、センサアドホックネットワークに対するNC理論の適用に実現性があり、Tree通信よりもスループット向上に効果があることも確認できた。

同時に被災地での実用化に向けて、いくつかの課題も明らかになった。本論文では階層型NC制御の評価に適した端末配置を用いたが、実際の運用場面を想定した多様な端末配置や通信距離での評価、複数のNC通信が混在する場合の検証が必要である。NC通信はリンク集合を駆使する通信方式であるため、一般的なTree通信と比べてパケット数が多く、複数のNC通信の混在がスループット劣化に与

える影響は大きいと考えられる。これに対して階層型 NC 方式では、すべての端末がネットワーク全体の NC 通信履歴を保持して、NC 通信相互に競合が発生しにくいリンク集合を調整するという解決方法を検討している。

また NC 通信のためのネットワーク設計手法を確立する必要がある。センサ観測の精度向上や広域な観測情報の把握のために、より多くの地点の観測結果を共有する通信が求められている。しかし、被災地では障害物や山岳地形等の電波伝搬を遮断する要因が多いため、センサ観測計画立案のために、NC 通信に最適なトポロジ配置やグループを決定する手法が必要となる。さらにネットワークに NC 理論を適用する理論的な研究も重要である。階層型 NC 方式は送信端末と受信端末の間に存在する NC グループ間では NC 理論による符号化ルーティングを行っていない。本論文では部分的な NC 理論の応用でもスループット向上の実現が可能であることを示したが、さらにスループット向上に効果的な NC 理論の応用方法の検討も必要である。

## 5. 関連研究

現在、符号化やグラフ等 NC 理論の研究により、スループット向上の効果だけでなく、新たに秘匿や誤り訂正等をネットワーク上で効率良く実現する提案が活発である [10]。NC 理論を実際にネットワーク上で実現する基本的な考えは、線形 Network Coding (線形 NC) として提案されている [11]。ここでは入力リンク数と出力リンク数に対応して、入力  $x$  を数式 (4) に示す行列式  $C$  を適用して符号化し、結果となる  $p$  を得る線形符号化関数を用いる。この計算を本提案では符号化ルーティングとして実現している。この線形 NC はパケット欠落や遅延がない理想的な通信環境の想定である。

$$p = Cx = \begin{bmatrix} \tilde{c}_1 \\ \tilde{c}_2 \\ \vdots \\ \tilde{c}_N \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} \tilde{c}_{1,1} & \tilde{c}_{1,2} & \dots & \tilde{c}_{1,N} \\ \tilde{c}_{2,2} & \tilde{c}_{2,2} & \dots & \tilde{c}_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{c}_{N,1} & \tilde{c}_{N,2} & \dots & \tilde{c}_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

近年、新たな NC 通信として注目されているのが、トポロジ構成に依存せず各端末が独立に符号化関数を決定する Random Network Coding (Random NC) の提案である [12]。Random NC は NC 通信を行いながら符号化関数を決定するため、簡潔な制御で実現でき、かつ端末移動のような動的なトポロジ変化に対応できる。しかし、動的にリンク集合を構成するため、計画的に符号化関数を決定する効率面での考慮が加えられない。我々の研究は、Dijkstra を用いる最適なリンク集合を計画的に利用する方式を提案している。

パケット欠落の危険を統計的に予測して、ある程度のパケット欠落を許容するという前提で、トポロジ変化に追従

してリンク集合を変更する提案がある [13]。しかし、被災地の電波伝搬状況は予測することは難しい利用条件に合わないため現実的ではない。

アドホックネットワーク上での多対多ブロードキャスト通信実現に、NC 通信を実現する方式の提案がある [14]。我々の研究と同様に符号化ルーティングの実現性に注目し、符号化ルーティングの同期問題を、隣接端末相互のパケットを監視して送信タイミングを調整する方式が解決する。しかし、これは低遅延の通信を許容する方式であるため、センサの低周期観測情報の送信には適さない。

## 6. おわりに

本論文ではセンサアドホックネットワークにおいて NC 通信を実現する階層型 NC 方式を提案し、シミュレーション評価から約 2.2 倍のスループット改善を実現して、ほぼパケット欠落のない NC 通信が実現できることを示した。この結論は、現実のセンサアドホックネットワークで NC 理論に基づく通信に実現性があることを意味している。これは提案方式による静的 NC 通信の手順と、階層型制御による NC 管理情報の削減による処理負荷の軽減、およびリンク再送制御によるデータパケット欠落の抑制により特定端末への負荷集中が回避され、符号化ルーティングの同期問題を解決した結果である。被災地では高い観測精度と迅速な観測結果の共有により、的確な災害救助を実現することが求められる。この要求に対して NC 理論による従来の Tree 通信の制約にとらわれず、無線の広報性を生かしてセンサ観測情報の配信に NC 通信は有効である。

NC 理論、および実用化の研究は始まったばかりである。階層型 NC 方式は、利用条件を移動のない静的な場合に限定しており、つねに再ルーティングが行われる複雑な場合の問題を排除している。また実際の被災地での運用場面を想定して、たとえば複数の NC 通信の混在する状況等の評価も必要である。さらに NC 理論にはスループット向上だけでなく、秘匿化や誤り訂正等、現在、研究されている符号化の効果も期待されており、NC 理論の適用方法、最適なセンサアドホックネットワークの設計方法等、NC 通信実現に向けた研究課題は多い。一方、センサをネットワーク化する研究も活発であり、ここから新たな NC 理論の活用方法が期待されることも予想される。今後はスループット向上以外の符号化の特性を生かす実現方式、また計画的なネットワーク運用を前提とせず、さらに適用の自由度が高い階層型 NC 方式の実現に向けて、理論、実現の双方から研究を進める。

## 参考文献

- [1] Ahlswede, R., Cai, N., Li, S.-Y.R. and Yeung, R.W.: Network Information Flow, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.46, No.4 (2000).

- [2] 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).
- [3] available from <http://www.scalable-networks.com/products/qualnet/>.
- [4] 寺島美昭, 河東晴子: Network Coding アドホックネットワークの設計と評価, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2009) シンポジウム, 6E-2 (2009).
- [5] RFC 3684, Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF), Network Working Group Request for Comments: 3685, Category Experimental (2004).
- [6] Kawahigasi, H. and Terashima, Y.: Security Aspects of the Linear Network Coding, *Military Communication Conference (MILCOM2007)* (2007).
- [7] Joa-Ng, M. and Lu, T.: A Peer-to-Poor Zone-Based Two-Level Link State Routing for Mobile Ad Hoc Network, *IEEE J. Sel. Areas Communication*, Vol.17, No.8, pp.1415-1425 (1999).
- [8] 坂本大吾, 旭 秀明, 橋本浩二, 高畑一夫, 柴田義孝: 無線 WAN による防災災害情報ネットワークの性能評価, 情報処理学会マルチメディアと分散処理 (DPS) 研究会, 100-12 (2000).
- [9] Optimized Link State Routing (OLSR), IFC 3626 (2003).
- [10] 河東晴子: ネットワークコーディング研究の動向, 電子情報通信学会誌, Vol.94, No.5 (2011).
- [11] Katti, S., Rahul, H., Hu, W., Katabi, D., Medard, M. and Cowcroft, J.: XORs in The Air: Practical Wireless Network Coding, *SIGCOMM06*, pp.243-254 (2006).
- [12] Ho, T., Koetter, R., Medard, M., Karger, D.R. and Effros, M.: The Benefits of Coding over Routing in a Randomized Setting, *Proc. IEEE Int. Symp on Information Theory* (2003).
- [13] Park, J.-S. and Gerla, M.: CODECAST: A Network-Coding-Based Ad Hoc Multicast Protocol, *IEEE Wireless Communication* (2006).
- [14] 近藤良久, 四方博之, 三浦 龍, 小花貞夫: ネットワークコーディングを用いた多対多端末高信頼・低遅延ブロードキャスト, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.3, 983-996 (2011).

#### 推薦文

本論文は、無線リンクにおける Network Coding 方式を用いた転送の効率化手法を提案している。提案手法は、Network Coding に階層化を導入し、トポロジ情報をすべての端末で共有することにより無駄な制御トラフィックを抑制し、効率的な通信を実現する手法であり、シミュレーションを用いて有効性が示されている。本手法は無線ネットワーク構築に応用が期待され、有用性も高いと考えられる。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 勝本道哲)



寺島 美昭 (正会員)

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勤務。2011年4月より創価大学非常勤講師。分散システムと適合性試験、形式的記述、センサアドホックネットワーク、ネットワーク評価に関する研究・開発に従事。著書に「プロトコル言語」(共著, カットシステム)。博士(工学)。電子情報通信学会会員。



清原 良三 (正会員)

1985年大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻前期課程修了。同年三菱電機(株)入社。1988年より(財)新世代コンピュータ技術開発機構に出向。1992年三菱電機(株)に復職。組込み機器のソフトウェア更新, JavaVM実装方式, 組込み機器の信頼性, 保守性向上に関する研究・開発に従事。2008年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士(情報科学)。2012年4月より神奈川工科大学情報学部情報工学科教授。ACM, IEEE, 電子情報通信学会各会員。



河東 晴子

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主席技師長。1991~1992年カリフォルニア大学バークレー校客員研究員。高速通信装置, 通信トラフィック・経路設計, ニューラルネットワーク, アドホックネットワーク, ネットワークコーディング等に関する研究・開発に従事。著書(翻訳)に『ネットワークコーディング』(原著ホーほか, 東京電機大学出版局)。博士(工学)。電子情報通信学会, 日本オペレーションズリサーチ学会, IEEE各会員。





中島 毅 (正会員)

1984年早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。1991年から1年間米国コロラド大学コロラドスプリングス校客員研究員。2008年早稲田大学大学院博士課程修了, 博士(工学)。

現在, 三菱電機(株)設計システム技術センター主管技師長, ソフトウェア生産技術に関する研究・開発に従事。著書に『IT TEXT ソフトウェア開発』(共著, オーム社)。技術士(情報工学/総合技術監理)。IEEE Computer Society, 電子情報通信学会, 電気学会各会員。