

階層型 Network Coding を用いた アドホックネットワーク評価方法の検討

寺島 美昭^{1,a)} 河東 晴子¹ 平田 和史¹

概要：Network Coding(NC) は、特定のネットワーク構成にて通信可能な最大情報量 (Max-Flow) を計算するグラフ理論の考えである。送信能力が制限される狭帯域リンクを Tree 構成で用いる従来の通信方法とは異なり、符号化により分割した情報を複数リンクに同時に配信する符号化ルーティングにより、最大情報量の通信 (NC 通信) を実現する。この方法は無線の広報性を活用して 1 対 N 通信を効率よく実現できる新たな通信理論として注目されている。しかし、現実の無線ネットワーク上では、伝送や制御遅延、伝送情報欠落、分割した通信間の同期など NC 理論では考慮されていない実装上の制約があるため、理論通りの効果を得る事は難しい。本報告ではアドホックネットワークにて NC 通信を実現するための課題分析、及び通信性能を検証する評価方法について述べる。評価方法としては、リンク集合の複雑度、トポロジーの階層構成、NC-CBR(Constant Bit Rate) によるアプリケーショントラフィック発生など NC 通信独自の方法を用いる。実際に我々が提案する階層型 NC 方式を対象にシミュレーション評価を行い効果を検証した。

1. はじめに

Network Coding(NC) は、ノードとリンクにより構成されるネットワークにおいて、通信可能な最大情報量 (Max-Flow) を計算するグラフ理論の考えである。NC は特定の情報を送信能力 (コスト) に制限のある単一リンクのみでなく、情報を符号化により分割して複数のリンクを同時に活用して送信する事により最大情報量を通信するアイデアに特徴がある。しかし、現実の無線アドホックネットワークに NC を応用して通信 (NC 通信) を行う場合には、伝送 / 処理遅延、伝送時の情報欠落、分割した情報を処理するタイミングなど、理論では考慮されていない以下の問題がある。

- 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。
- 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、更に、この遅延がリンク集合に伝播する事によりスループットが大幅に劣化する。

本報告ではアドホックネットワークにて NC 通信を実現する視点から、課題の分析と評価方法の検討、及び我々が

提案する階層型 NC 方式に関する 3 つの評価の結果を述べ、実用化の課題を考察する。

階層型 NC 方式は、端末が静止している時に通信が行われる静的ネットワーク運用である事を前提とする。この前提により全端末がトポロジー情報 (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 準備段階と実際に NC 通信を行う段階 (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、トポロジーをグループ (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。

階層型 NC 方式の評価では 5Km × 5Km に 64 端末を配置した環境に対して、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無い NC 通信が実現できる結果が得られた。この時は約 97% のパケット到達率と NC 理論の理想動作に近く、この結論は NC 理論をアドホックネットワークに適用する事の実現性がある事を示している。さらに、これらの評価結果から実現の課題を考察する。

2. 動作

NC 通信は複数の端末から受信する情報を、まとめて符

¹ 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所
Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

^{a)} Terashima.Yoshiaki@eb.MitsubishiElectric.co.jp

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事により回避できる。

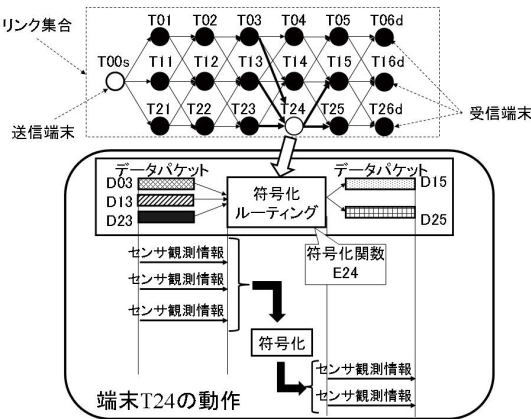


図 1 符号化ルーティングの動作

図 1 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。例えば中継端末 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、各端末は予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、及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全ての端末間が NC 管理情報を調整する事により、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。予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事により、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。

3. 課題と評価方法

3.1 評価方法の検討

NC 通信を実現するアドホックネットワークでは、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 通信の成立自体の障害や、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[1] を用いて、NC 通信のスループットを計算した。[2] ここでは NC 通信でのリンク構成を客観的に表現する値として“複雑度”を、また評価するネットワーク構成では、“トポロジ多段構成”を、さらにユーザトラフィックモデルとして、“NC-CBR(NC-Constant Bit Rate)”を定義した。

複雑度

NC 理論では、同一のノード (V) 数から構成されるネットワークにおいて、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劣化をさらに悪化させる。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。この定義を用いる事により同一の 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。

トポロジの多段構成

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た。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 端末構成である。各端末は格子状の境界端末、及び 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、例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。

表 1 NC-CBR パラメータ

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

NC-CBR(Constant Bit Rate)

アプリケーショントラフィックのモデルとして、CBR 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、一定周期でセンサ観測結果に相当する情報を送信する。例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、300bytes のパケットを 0.5sec 間隔で 1000 回送信する事を意味している。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

符号化ルーティングモデル

図 2 は符号化ルーティングのシミュレーションモデルである。符号化ルーティングは異なる端末から受信する受信パケット D1, D2, D3 を符号化関数 E にて符号化し、この結果を送信パケット D5, D6 を 2 つの端末に配信する。これは 3 入力 (In) に対して 2 出力 (Out) となる、NC 通信特有の動作である。この送信、受信端末との間は NC_Send_Request パケットを送信し、この結果を NC_Send_Reply パケットを受信する事で成否を判断する。この処理負荷を模擬するために、表 2 に示すパラメータを用意する。

表 2 符号化ルーティングモデルのパラメータ

パラメータ	機能
NC-RETRY-SEND-REQUEST-LIMIT	NC_Send_Request パケットの最大再送回数
NC-WAIT-FOR-REPLY-INTERVAL	NC_Send_Request パケットの送信確認タイムアウト時間
NC-TABLE-ENTRY-LIFE-TIME	符号化ルーティングの端末構成や符号化関数情報を管理情報として端末が保持する最大時間。この時間内に NC_Send_Request パケットを受信しない場合、管理情報は破棄される。
NC-CODING-COMPUTATION-TIME	符号化関数 E による符号化計算処理時間。

3.2 課題の分析

端末を 4 × 4 の格子状に配置した 2 段構成、合計 32 端末のトポロジ構成を用いて、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。図 3 は端末間の距離を 250m, 300m, 350m 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、例えば 350m 間隔の場合は送信データ量約 400bytes 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よい 300m,

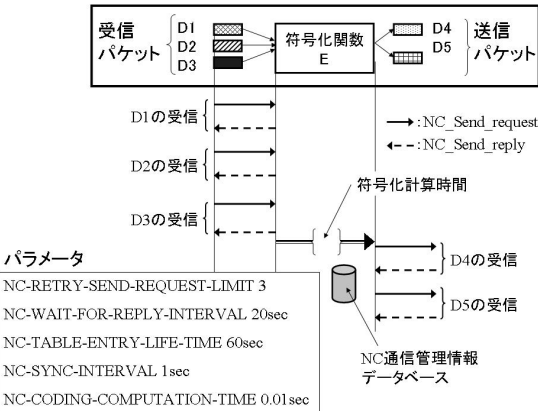


図 2 符号化ルーティングモデル

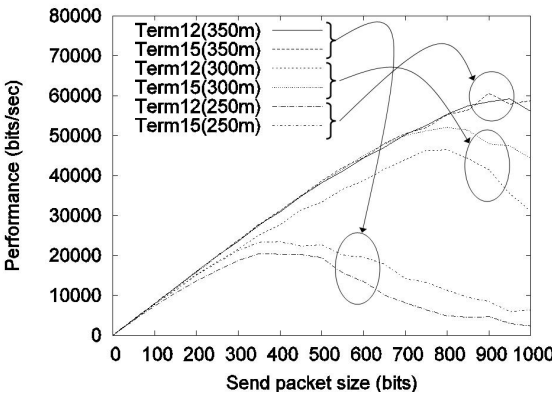


図 3 NC 通信のスループット傾向

250m 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 800bytes, 900bytes 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、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。第一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。例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。

第二の要因は、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全ての端末がマルチホップで接続されるため、例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。

4. 評価

4.1 手順

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、3 章にて検討した評価方法を用いて、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を比較、検証した。端末配置の規模は、3 章にて課題を分析した実験と親和性があるが、さらに符号化ルーティングの複雑さのバリエーションを作るために、端末数を 64 に増やした図 4 に示す構成である。端末の展開は被災地規模でのセンサ観測を想定して [3]、端末を 5Km × 5Km 範囲に 300m 間隔としている。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 1000bytes、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、3 章にて実現の課題を分析したシミュレーションにて、実現可能な最大性能を示した値である。

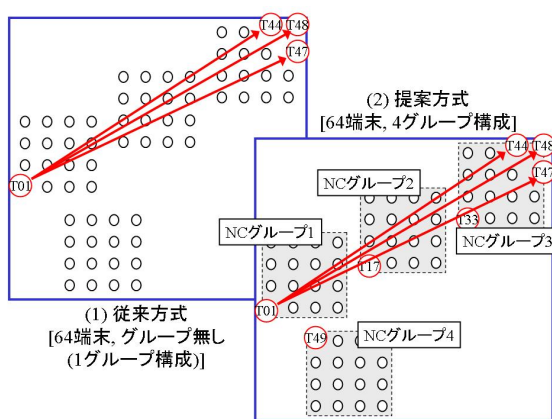


図 4 提案方式と従来方式の比較

図 4 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。例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などがあり得る。しかし、ここ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 章では、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、及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 章では、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 章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)。4.3 章にて、提案方式によるスループット向上の結果をまとめ、最後に 4.4 章にて今後の課題を考察する。

4.2 実験

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合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 グループ毎に算出している。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%の結果である。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 グループ毎のパケット送受信量と比較した場合、例えば 3 つの受信端末を含み制御パケットの送受が最も多い 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通り 4 つの NC グループへ分散化されている事が確認できる。

表 3 NC 準備段階での制御パケット総量の比較

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)	—	96735	34944
提案方式 (4 グ ループ)	1	23990	8054
	2	21753	7248
	3	24771	8599
	4	25504	8861
	合計	96018	32762

表 4 NC 通信段階でのデータパケット総量の比較

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)	87122	46364	3362
提案方式 (4 グループ)	76769	37559	1559

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% 減少する事を確認した。

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事が確認できた。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 方式の設計である事に加え、取り扱うパケ
ット数が減少して衝突の機会が減った事による相乗効果も
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 5 にて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 回とする事で、
階層制御のみを有効とする設定である。なお、図 5、及び
後に説明する図 6、図 7 に示す方式毎の 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。

また一般的な Tree 通信との差を検証するために、図
4 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)[4] 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) にて再
送無しで実行する事により、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 と比較する事により、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 500bytes
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事が分かる。送信
データ量が 500bytes の送信データ量の時は、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
は無い。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、常に Tree 通信よりもス
ループット改善に有効である事が確認できた。

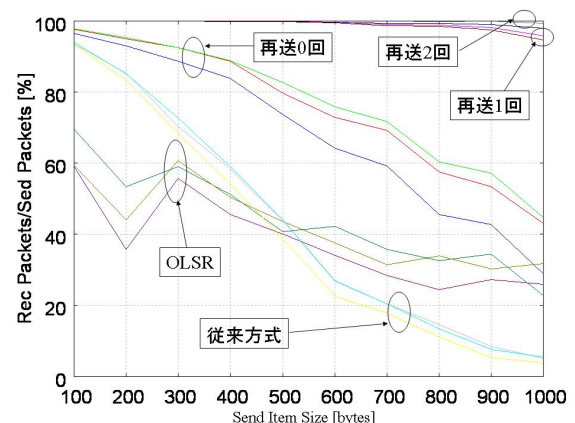


図 5 パケット到達率の比較 (提案方式と従来方式)

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 6 にて提案方式と
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 2 と同じ評価を図 4 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 400bytes の場合をピークに劣
化するのに対して、提案方式は 700bytes 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 ~ 900bytes 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 400bytes 時の値は、3 つの受信端
末の平均で 3671.3bytes/sec である。これに対して提案方式
は 5584.0bytes/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
900bytes の値は、7376.0bytes/sec であり、最大スループ
ットで比較すると約 2.0 倍を達成している。送信時データ劣
化が始める送信データ量も、従来方式が 400bytes 送信時で

ある事に対して提案方式は 700bytes 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常に 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事が確認できる。

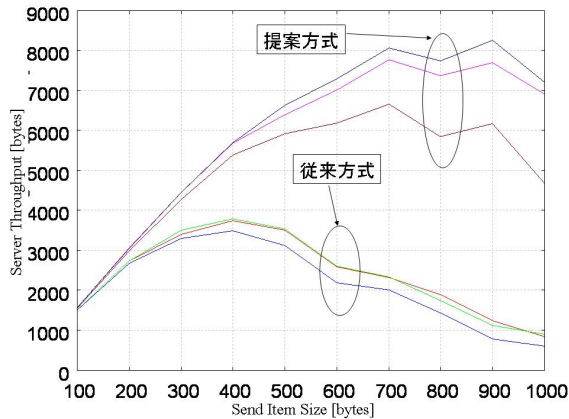


図 6 スループットの比較 (提案方式と従来方式)

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 5 にて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 500bytes の場合に、3 受信端末の平均で約 78.7%まで劣化し、1000bytes 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無い NC 通信を実現している。

図 7 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 6 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 700bytes の時に平均スループットが 7494.0bytes/sec で頭打ちになるが、再送回数 1 回の時は 11105.3bytes/sec、再送回数 2 回の時では 11212.0bytes/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、常に 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事が確認できた。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事が分かった。

4.3 考察

実験 1, 実験 2, 実験 3 で用いたパラメータは、図 2 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 0.4sec の値を用いてスループットを計算した結果が図 7 の提案方式 (最適化) である。図 6 で示した従来方式の 3671.3byte/sec と比較すると同じ送信データ量 400bytes の時は 7968.7bytes/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事を示している。

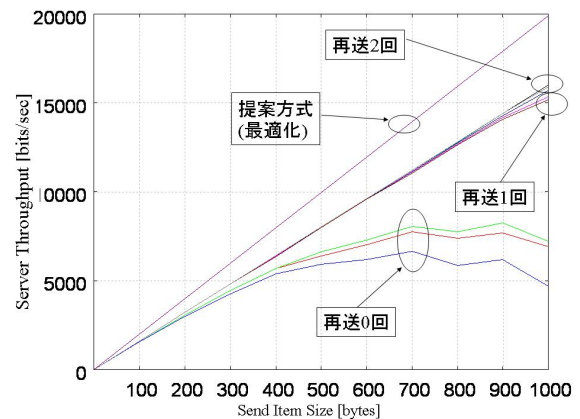


図 7 スループット改善の傾向 (提案方式)

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結論を得た。パケット到達率は、ほぼ欠落の無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事を確認した。

4.4 実現の課題分析

評価では NC 通信の実用化に向けて、表 5 に示す課題も明らかになった。今回は階層型 NC 制御の方式評価に適した端末配置を用いたが、実際の運用では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。これに対して階層型 NC 方式では、全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解決方

法を検討している。

表 5 NC 通信実現の課題

課題	内容	改善
端末配置	端末配置や端末間距離のバリエーション評価	多段階層化によりトラフィックを分散する方式の開発
NC 通信混在	1 つのネットワーク (トポロジ) 内での NC 通信の混在	全ての端末が NC 通信状況を共有する事による排他的な NC 制御方式の開発
階層間 NC 通信方式	階層間 (NC グループ間) の通信方式	NC グループを一つのノードとして NC 通信を実現する方式の開発
ネットワーク設計手法	NC 通信を実現する能動的端末配置の設計方法	ネットワークシミュレーションによる能動的トポロジ計算方式の開発
NC 理論の効果	伝送性能向上に加え、秘匿性、伝達情報の確実性 (情報の復元) など新たな効果の活用方法	QoS やセキュリティ機能拡張方式の開発

図 8 は、従来方式について複雑度とスループットの関係をシミュレートした結果である。NC-CBR の送信データ単位を 100byte から 1000byte まで 100byte 間隔の 10 種類のスループットについて、複雑度を 1 から 10 まで増加させた結果を示している。また図 9 は、同じく従来方式について NC-CBR による 1 対 N 通信の受信端末数を 1 から 6 まで増加させた時の、スループットの劣化傾向である。受信端末が多いほど早い段階でスループットが劣化する傾向を示している。これらの結果からは予想通り複雑度や受信端末数が多くリンク集合の制御が複雑であるほどスループットが悪く NC 通信が成立しない場合もある。これらの結果からは NC 通信によるスループット向上の効果を得るためには、現段階では計画的に端末を配置する事が不可欠であり、センサ展開の自由度には依然として限界がある問題が確認できた。

この評価結果から、NC 通信のためのネットワーク設計手法の確立が不可欠であると考えられる。階層型 NC 方式は静的な端末配置を前提にしているが、予め通信性能から最適なリンク集合の配置を決定するトポロジ設計方式が必要となる。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

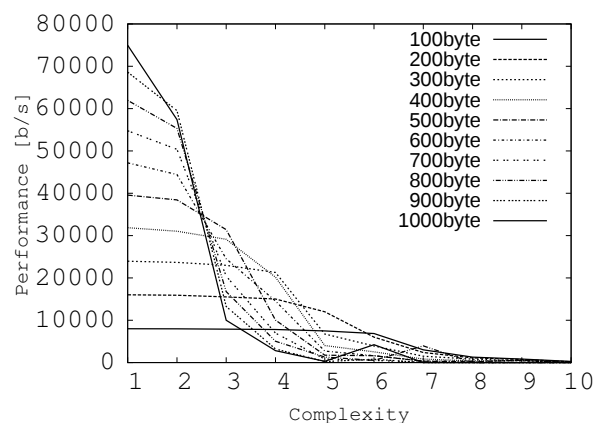


図 8 複雑度とスループットの関係

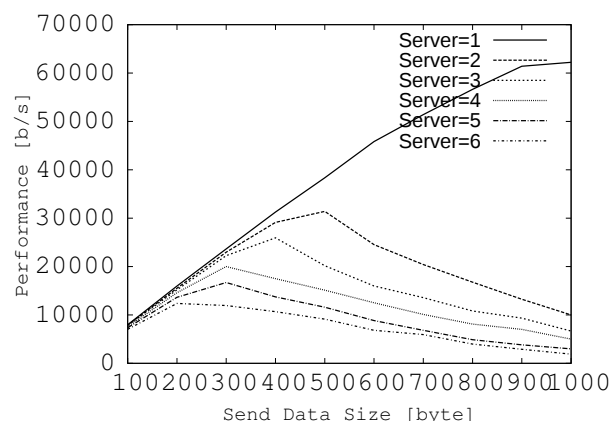


図 9 受信端末数とスループットの関係

符号化ルーティングを行っていない。今回の評価では部分的な 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事を示したが、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. おわりに

本報告ではアドホックネットワークにおける NC 通信の評価方式を検討し、実際に階層型 NC 方式のシミュレーション評価に用いる事により、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無い NC 通信が実現できる事を確認した。また NC 通信の実用化の課題として、制御トラフィックの削減とともにネットワーク設計手法の確立が重要である事が分かった。

NC 理論、及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、利用条件を移動の無い静的な場合に限定しており、常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、例えば複数の NC 通信の混在する状況など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など、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事も予想される．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] <http://www.scalable-networks.com/products/qualnet/>
- [2] 寺島美昭、清原良三、河東晴子、中島毅: 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, 情報処理学会論文誌 Vol.53 No.8 1976–1990 (Aug. 2012)
- [3] 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)
- [4] Optimized Link State Routing (OLSR), IFC 3626 (2003)